

# 高运动性能轮腿机器人复杂环境越障控制方法<sup>\*</sup>

邓 广<sup>1</sup> 姚江云<sup>2</sup> 王宽田<sup>1</sup> 陈国庆<sup>1</sup>

(1. 桂林电子科技大学 海洋工程学院 北海 536000; 2. 柳州工学院信息科学与工程学院 柳州 545000)

**摘要:** 轮腿机器人在越障时,其动力学模型会因轮腿切换因素变得高度非线性,但是现有的线性控制方法难以准确描述这种非线性特性,导致机器人越障控制效果差。为此,提出复杂环境下高运动性能轮腿机器人越障控制方法。该方法在深入分析轮腿机器人越障过程受力情况基础上,将控制轮腿机器人轮腿运动的电动机角速度作为关键控制对象,在进一步分析轮腿机器人越障过程步态情况,得到轮腿机器人越障位置误差,将该误差输入到模糊级联 PID 控制器中,同时引入自适应伸缩因子优化 PID 控制器参数,以适应轮腿机器人在越障过程中的非线性动力学特性,依据复杂障碍环境动态生成轮腿机器人电动机角速度调整量,实现轮腿机器人越障控制。实验验证表明,该方法能够实现不同台阶、斜坡、沟渠障碍及多种复合障碍环境下轮腿机器人越障,在控制过程中轮腿机器人打滑率均能够小于 0.1%,运行稳定性均高于 95%,且轮腿机器人质心变化轨迹较平缓,充分证明该方法实现轮腿机器人越障控制具有稳定性,能够有效推动轮腿机器人越障领域发展。

**关键词:** 复杂环境;轮腿机器人;越障控制;受力分析;步态分析;模糊级联 PID

中图分类号: TP24; TN87 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.2040

## Obstacle crossing control method in complex environment for wheel-legged robot with high motion performance

Deng Guang<sup>1</sup> Yao Jiangyun<sup>2</sup> Wang Kuantian<sup>1</sup> Chen Guoqing<sup>1</sup>

(1. Ocean Engineering College, Guilin University of Electronic Technology, Beihai 536000, China;

2. School of Information Science and Engineering, Liuzhou Institute of Technology, Liuzhou 545000, China)

**Abstract:** When a wheel-legged robot is crossing an obstacle, its dynamic model will become highly nonlinear due to the wheel-legged switching factor, but the existing linear control methods are difficult to accurately describe this nonlinear characteristic, resulting in poor control effect of the robot. Therefore, an obstacle crossing control method for wheel-legged robot with high motion performance in complex environment is proposed. On the basis of in-depth analysis of the stress conditions in the obstacle crossing process of the wheel-legged robot, the method takes the angular velocity of the motor controlling the wheel leg movement of the wheel-legged robot as the key control object, and further analyzes the gait of the wheel-legged robot during the obstacle crossing process to obtain the obstacle crossing position error of the wheel-legged robot, which is input into the fuzzy cascade PID controller. At the same time, adaptive scaling factor is introduced to optimize PID controller parameters to adapt to the nonlinear dynamic characteristics of the wheelleg robot in the obstacle crossing process, and the angular velocity adjustment of the wheelleg robot motor is dynamically generated according to the complex obstacle environment to realize the obstacle crossing control of the wheelleg robot. Experimental verification shows that this method can achieve obstacle crossing of wheellegged robots under different steps, slopes, gullies and multiple compound obstacles. In the control process, the slip rate of wheellegged robots can be less than 0.1%, the operational stability is higher than 95%, and the change trajectory of the centroid of wheellegged robots is relatively gentle, which fully proves that this method can achieve the control stability of wheellegged robots over obstacles. It can effectively promote the development of wheel-leg robot in obstacle crossing field.

**Keywords:** complex environment; wheel-legged robot; obstacle control; force analysis; gait analysis; fuzzy cascade PID

## 0 引言

轮腿机器人作为一种结合了轮式移动和腿式移动优势

的机器人,以其卓越的高速移动能力和复杂环境适应能力,在工业、医疗、军事等多个领域展现出广泛的应用前景<sup>[1]</sup>。这类机器人能够在不同地形和障碍物环境中灵活移动,极

大地提高了任务执行效率和范围<sup>[2]</sup>。然而,在高度复杂的环境条件下,轮腿机器人在执行越障动作时面临着运行安全隐患,如姿态失稳、能耗过大等问题,这些挑战限制了其在实际应用中的性能发挥和可靠性。

目前在机器人控制领域,钟道方等<sup>[3]</sup>依据集成传感器实时监测轮腿机器人运行环境,利用图像处理算法识别并分类遇到的障碍物类型、尺寸,依据轮腿机器人内置算法计算多条越障路径,考虑能耗等因素选择最优路径,调整其轮腿的运动模式和力度,以适应不同的地形和障碍物,通过闭环反馈系统实时监测机器人的姿态和位置,确保平稳过渡。但该方法中越障路径规划和决策制定涉及复杂的计算,导致实际的轮腿机器人越障控制实时性较差。刘宁波等<sup>[4]</sup>深入分析轮腿机器人物理特性和运动学原理,依据有限状态机构建轮腿机器人越障过程中可能遇到的所有状态参数集合,获取轮腿机器人越障的姿态序列。构建能够模拟轮腿机器人在实际越障过程中的运动轨迹和状态变化的控制模型,通过 B 样条曲线跟踪求解模型,实现轮腿机器人的越障控制。但由于实际环境复杂性和轮腿机器人运动的不确定性,通过有限状态机构建的状态参数集合并不全面,导致越障控制效果较差。张秀丽等<sup>[5]</sup>对轮腿机器人进行分析,构建轨迹平滑性等多种约束,进行轮腿机器人越障轨迹优化。对轮腿机器人支腿位置、角度计算,通过分阶段控制器,适应轮腿机器人越障不同阶段,引入比例-微分控制实现轮腿机器人越障控制过程。但该方法中涉及多种约束条件,增加了轮腿机器人越障优化控制的复杂性和非线性,影响轮腿机器人越障控制效果。徐显金等<sup>[6]</sup>深入分析轮腿机器人工作姿态,明确轮腿机器人运行过程中磁致动驱动器原理,通过拉格朗日法构建轮腿机器人越障动力模型,依据动力学方程确定轮腿机器人各个关键参数间关联性,引入 PI 滑模控制对轮腿机器人越障过程进行控制。但该方法中易受到磁致动驱动器干扰,导致实际轮腿机器人越障控制效果较差。

针对上述情况,本文提出一种复杂环境下高运动性能轮腿机器人越障控制方法。该方法通过深入分析轮腿机器人越障过程中的受力情况和步态特征<sup>[7]</sup>,将电动机角速度作为关键控制对象,利用模糊级联 PID 控制器对轮腿运动进行精确控制。同时,引入自适应伸缩因子动态调整 PID 参数,以适应轮腿机器人在越障过程中的非线性动力学特性。该方法旨在实现复杂环境下轮腿机器人越障的高稳定性和运动性能,通过动态生成电动机角速度调整量,确保轮腿机器人在不同台阶、斜坡、沟渠及复合障碍环境中稳定越障。实验证明,该方法能够显著降低轮腿机器人在越障过程中的打滑率,提高运行稳定性,并优化质心变化轨迹,为轮腿机器人越障领域的发展提供了有效的技术支撑和理论参考。

## 1 高运动性能轮腿机器人越障控制方法

### 1.1 轮腿机器人越障受力分析

在轮腿机器人运行过程中,通过对越障过程的

受力分析<sup>[8]</sup>,充分了解轮腿机器人的受力状态和运动姿态,依据得到的结果实现轮腿机器人越障控制,以提升轮腿机器人的越障能力<sup>[9]</sup>。在轮腿机器人越障过程中,其越障支腿处与待越过的障碍物接触后,轮腿机器人的支腿进行圆周运动,通常情况下支腿与障碍物接触位置处不应存在相对滑动情况<sup>[10]</sup>,此时轮腿机器人受到障碍物的支撑反作用力  $F_N$  和接触间的摩擦力  $f$  应足够大,从而确保轮腿机器人的稳定越障。在轮腿机器人越障过程中,以其中一个支腿为例进行受力分析,在其与障碍物接触位置处构建坐标系,轮腿机器人越障受力分析情况如图 1 所示。

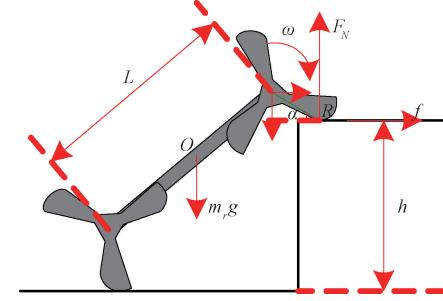


图 1 轮腿机器人越障受力分析情况

Fig. 1 Force analysis of obstacle crossing for wheeled legged robots

如图 1 所示,构建轮腿机器人越障力平衡方程、力矩平衡方程,表示为:

$$F_y + f - m_1 R \omega^2 \cos\alpha = 0 \quad (1)$$

$$F_x + m_1 g - F_N - m_1 R \omega^2 \sin\alpha = 0 \quad (2)$$

$$T_m + T_1 - T - m_1 g R \cos\alpha = 0 \quad (3)$$

其中,式(1)、(2)分别表示竖直、水平方向轮腿机器人越障力平衡方程,式(3)表示力矩平衡方程,  $T_m$  表示轮腿机器人中控制支腿运动的电动机转矩值,  $T_1, T$  表示轮腿机器人支腿等效力矩值、轮腿机器人质心 O 处重力作用对轮腿机器人支腿产生的等效力矩,  $F_x, F_y$  分别表示轮腿机器人对支腿造成水平、竖直方向作用力,  $m_1$  表示轮腿机器人单个支腿质量,  $\alpha$  表示与障碍物接触的轮腿机器人支腿与轮腿机器人轮中心连线和水平方向的夹角,  $g$  表示重力加速度,通常情况下为  $9.8 \text{ m/s}^2$ ,  $R$  表示轮腿机器人的轮直径,  $\omega$  表示轮腿机器人中控制支腿运动的电动机角速度。

在式(1)~(3)构建的轮腿机器人越障力平衡方程、力矩平衡方程中,存在如下关系:

$$T = m_r g [L_r^2 - (R \sin\alpha + h_r)^2]^{1/2} / 4 \quad (4)$$

$$T_1 = F_x R \sin\alpha - F_y R \cos\alpha \quad (5)$$

$$T_m = P / \omega \quad (6)$$

其中,  $P$  表示轮腿机器人中控制支腿运动的电动机功率值,  $m_r$  表示轮腿机器人总质量,  $h_r$  表示障碍物高度,  $L_r$  表示轮腿机器人长度。

设在轮腿机器人越障过程中,轮腿机器人越障支腿与障碍物接触位置处在相对滑动的极限状态,即此时轮腿机

器人越障支腿与障碍物接触位置处的摩擦力大小表示为：

$$f = \mu F_N \quad (7)$$

其中， $\mu$  表示摩擦因数。

综合联立式(1)~(6)，则能够得到：

$$F_N = \{P/\omega - m_r g [L_r^2 - (R \sin\alpha + h_r)^2]^{1/2}/4\} / R(\mu \sin\alpha + \cos\alpha) \quad (8)$$

依据式(8)，得到轮腿机器人受到障碍物的支撑反作用力，从而能够判断出轮腿机器人越障过程中发生滑动的临界值状态。

## 1.2 轮腿机器人越障步态分析

在实际的轮腿机器人越障过程中，地形环境较为复杂且障碍物情况存在未知性，造成轮腿机器人越障困难<sup>[11]</sup>。为此，论文依据 2.1 小节中实现的轮腿机器人越障受力分析，确定轮腿机器人越障过程中发生滑动的临界值，由式(8)可知，轮腿机器人越障的平稳性与轮腿机器人中控制支腿运动的电动机角速度  $\omega$  有关<sup>[12]</sup>。在实际的轮腿机器人实现越障动作过程中，控制支腿运动的电动机角速度即能够实现轮腿机器人运行速度，电动机角速度越大，则轮腿机器人运行越快<sup>[13]</sup>。

设轮腿机器人越障过程中，两侧轮腿的速度分别为  $v_i$ 、 $v_r$ ， $s_{ir}$  表示轮腿机器人左、右侧轮腿之间的距离，设轮腿机器人越障过程从  $A_1$  位置处移动至  $A_2$  位置处，两处的坐标分别表示为  $(x_{A_1}, y_{A_1})$ 、 $(x_{A_2}, y_{A_2})$ ，在轮腿机器人越障过程中，其运行速度和控制支腿运动的电动机角速度分别表示为：

$$v_r = (v_i + v_r)/2 \quad (9)$$

$$\omega = (v_i - v_r)/s_{ir} \quad (10)$$

由于轮腿机器人越障过程中受环境影响，轨迹  $A_1 A_2$  可能为曲线或折线，通过时间微分处理为多段直线，则时刻  $t$  的轮腿机器人位姿情况，可以通过轮腿机器人运行速度和控制支腿运动的电动机角速度进行计算，表示为：

$$x_t = x_{t-1} + v_r \cos\beta_{t-1} \Delta t \quad (11)$$

$$y_t = y_{t-1} + v_r \sin\beta_{t-1} \Delta t \quad (12)$$

$$\beta_t = \beta_{t-1} + \omega \Delta t \quad (13)$$

其中， $x_t$ 、 $y_t$  分别表示  $t$  时刻在以轮腿机器人初始位置  $A_1$  为原点，轮腿机器人前进方向以及垂直于轮腿机器人前进方向分别为  $y$  轴和  $x$  轴的坐标系中对应的横、纵坐标信息， $\beta_t$  表示  $t$  时刻轮腿机器人越障过程前进偏移角度， $\Delta t$  表示  $t$  时刻与  $t-1$  时刻之间的时间间隔情况。

通过上述过程能够实现轮腿机器人越障过程中的步态分析，为实现复杂环境下高运动性能轮腿机器人越障控制，对轮腿机器人越障后的实际位置  $A'_2(x_{A'_2}, y_{A'_2})$  与理想位置  $A_2(x_{A_2}, y_{A_2})$  之间的偏差值情况进行计算，表示为：

$$\delta = [(x_{A_2} - x_{A'_2})^2 + (y_{A_2} - y_{A'_2})^2]^{1/2} \quad (14)$$

依据式(14)能够得到轮腿机器人越障误差值，为后续轮腿机器人越障控制提供良好依据。

## 1.3 基于模糊级联 PID 控制器的轮腿机器人越障控制

根据 2.2 小节获取的轮腿机器人越障误差值，通过模糊级联 PID 控制器对轮腿机器人越障进行控制，以适应轮腿机器人在越障过程中的非线性动力学特性，提升机器人越障控制效果<sup>[14]</sup>。

此时，将轮腿机器人越障误差值输入至 PID 控制器中，通过 PID 控制器比例、积分、微分过程对轮腿机器人越障误差值进行处理。对轮腿机器人中控制支腿运动的电动机角速度进行调整，以实现轮腿机器人越障控制，则输出的电动机角速度控制量表示为：

$$\Delta\omega(t) = K_p \left[ \delta_t + \left( \int_0^t \delta_t dt \right) / K_I + K_D d\delta(t) / dt \right] \quad (15)$$

其中， $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  分别表示 PID 控制器中的比例、积分、微分系数。

通过 PID 控制器实现轮腿机器人越障控制的传递函数表示为：

$$q(\Delta\delta) = K_p (1 + 1/K_I \Delta\delta + K_D \Delta\delta) \quad (16)$$

其中， $\Delta\delta$  表示 PID 控制器控制轮腿机器人越障后，轮腿机器人偏差变化值。

在传统 PID 控制器中引入自适应伸缩因子  $\xi_c$ ，实现 PID 控制器的模糊级联优化，以适应轮腿机器人越障的非线性控制过程<sup>[15]</sup>， $\xi_c$  的计算过程表示为：

$$\begin{aligned} \xi_c &= \psi_1 / [\lceil |\Delta\delta(t)| (\phi_1 + \phi_2) + \sigma \rceil + \\ &\psi_2 / \lceil |\Delta\delta'(t)| (\phi_1 + \phi_2) + \sigma \rceil] \end{aligned} \quad (17)$$

其中， $\sigma$  表示数值极小的随机正数， $\Delta\delta(t)$ 、 $\Delta\delta'(t)$  表示输入的变量， $\phi_1$ 、 $\phi_2$  分别表示  $\Delta\delta'(t)$ 、 $\Delta\delta(t)$  对应的模糊论域边界值。

通过模糊级联 PID 控制器对输入的轮腿机器人越障偏差值进行处理，其中传统  $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  参数进行更新，分别表示为：

$$K'_p = \varsigma \cos\chi / \kappa \quad (18)$$

$$K'_I = \pi \varsigma \cos^2\chi / \kappa\eta (1 + \sin\chi) \quad (19)$$

$$K'_D = \varsigma \eta (1 + \sin\chi) / 4\pi\kappa \quad (20)$$

其中， $\varsigma$ 、 $\eta$  分别表示临界增益、周期， $\chi$ 、 $\kappa$  分别表示调整系数、幅度。

基于式(18)~(20)的系数更新，代入式(15)中，最终能够输出电动机角速度控制量，依据该值能够实现轮腿机器人越障控制，有效降低轮腿机器人越障误差，提升轮腿机器人越障稳定性。

## 2 实验与分析

### 2.1 实验设计

为验证本文方法实现复杂环境下高运动性能轮腿机器人越障控制的有效性，以轮辐形轮腿机器人为例进行研究，实际的轮腿机器人越障场景如图 2 所示。

如图 2 所示的轮腿机器人越障场景图中，对轮腿机器



图 2 轮腿机器人越障场景图

Fig. 2 Obstacle crossing scene of wheeled legged robot

人相关参数及障碍物设置的具体情况进行分析统计,得到的实际参数情况如表 1 所示。

表 1 轮腿机器人越障实际参数情况

Table 1 Actual parameters of obstacle crossing for wheeled legged robots

类别	参数	实际值
轮腿 机器人	总重量/kg	10.6
	轮腿直径/m	0.3
	最大行走速度/(m·s <sup>-1</sup> )	2
	最大越障高度/m	0.6
	电源续航/h	4
	传感器配置	激光雷达、红外传感器、摄像头等
障碍物	类型	台阶、斜坡、沟渠
	台阶高度/m	0.3、0.45、0.6
	斜坡坡度/(°)	15、30、45
	沟渠宽度/m	0.4、0.6、0.8

如表 1 所示,依据试验轮腿机器人进行越障研究,分别设置不同种类、不同障碍条件的情况,以充分验证本文方法实现轮腿机器人越障控制的有效性。

## 2.2 越障效果模拟

通过 ADAMS 仿真软件对轮腿机器人模型和模拟障碍模型进行仿真,以验证通过本文方法实现轮腿机器人越障控制的能力,仿真结果如图 3 所示。

如图 3 所示,通过仿真分析,本文方法能够使轮腿机器人有效应对台阶、沟渠、斜坡等多种不同障碍情况,实现较为平稳的越障,有效提升轮腿机器人越障的稳定性。

## 2.3 机器人越障性能分析

### 1) 越障电动机角速度变化

为验证本文方法实现轮腿机器人越障控制有效性,模拟 3 种障碍环境情况,分别为:障碍 1:0.4 m 位置处 30°木质斜坡障碍;障碍 2:0.4 m 位置处宽度 0.8 m 沟渠障碍;障碍 3:0.4 m 处 0.45 m 高台阶障碍。对几种障碍条件下通过本文方法实现轮腿机器人越障控制的电动机角速度变化情况进行统计,得到的结果如图 4 所示。

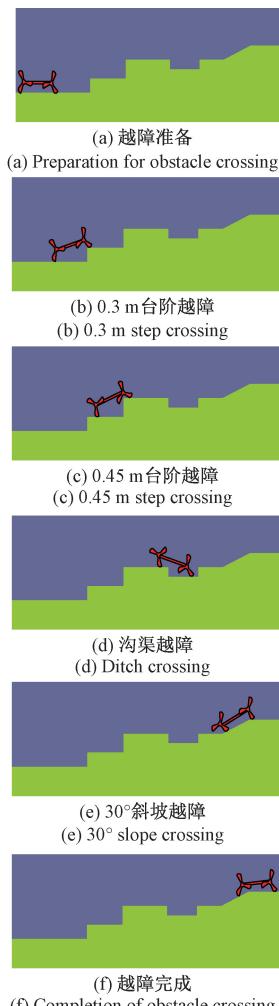


图 3 轮腿机器人越障仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of obstacle crossing for a wheeled legged robot

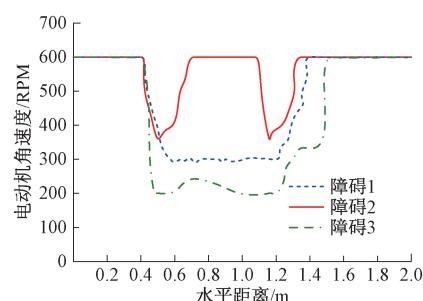


图 4 轮腿机器人越障电动机角速度变化情况

Fig. 4 Changes in angular velocity of obstacle crossing motor for wheeled legged robot

如图 4 所示,通过本文方法实现的轮腿机器人越障控制在不同模拟障碍条件下均具有显著效果。通过本文方法实现轮腿机器人越障过程中,模糊级联 PID 控制器能够有效调控电动机角速度,使角速度降低以实现平稳越障过程,证明本文方法能够有效实现轮腿机器人越障控制,显著提

升轮腿机器人越障的稳定性。

### 2) 越障控制质心变化分析

为验证本文方法实现轮腿机器人越障控制的有效性,对复杂障碍环境下通过本文方法控制的轮腿机器人越障过程中轮腿机器人的质心变化情况进行统计。将本文方法与 PI 控制方法、传感器控制方法、B 样条曲线方法进行对比,得到的结果如图 5 所示。

如图 5 所示,几种方法实现轮腿机器人越障控制的效果存在较大差异。PI 控制方法、传感器控制方法、B 样条曲线方法实现的轮腿机器人越障控制中,轮腿机器人在斜坡、沟渠、台阶中均发生打滑、翻转等情况,导致轮腿机器人越障过程不稳定。通过本文方法实现轮腿机器人越障控制中的轮腿机器人质心变化曲线较为稳定,能够有效跨越斜坡、沟渠、台阶障碍,证明了本文方法实现轮腿机器人越障控制的有效性。

### 3) 越障控制结果

为进一步验证本文方法实现轮腿机器人越障控制的效

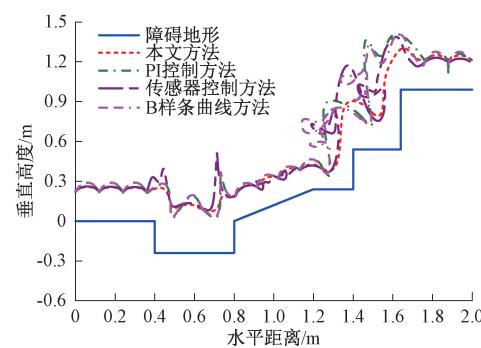


图 5 轮腿机器人越障控制质心变化情况

Fig. 5 Changes in the centroid of obstacle crossing control for a wheeled legged robot

果,模拟不同障碍环境下的轮腿机器人越障情况,对通过本文方法实现轮腿机器人越障控制的轮腿机器人运行打滑率和稳定性进行统计,得到的轮腿机器人越障控制结果如表 2 所示。

表 2 轮腿机器人越障控制结果

Table 2 Obstacle crossing control results of wheeled legged robots

障碍环境	障碍类型	障碍参数	通过性	打滑率/%	稳定性/%
单独障碍	台阶	0.3 m 高	通过	0	99.82
		0.45 m 高	通过	0	97.61
		0.6 m 高	通过	0	96.85
	斜坡	15°	通过	0.08	99.66
		30°	通过	0.01	98.54
		45°	通过	0.06	98.71
	沟渠	0.4 m 宽	通过	0.05	99.73
		0.6 m 宽	通过	0.01	98.97
		0.8 m 宽	通过	0	97.83
复合障碍	台阶 + 斜坡	0.6 m 高 + 45°	通过	0.02	98.57
	台阶 + 沟渠	0.6 m 高 + 0.8 m 宽	通过	0.05	97.83
	斜坡 + 沟渠	45° + 0.8 m 宽	通过	0.01	98.66
	台阶 + 斜坡 + 沟渠	0.6 m 高 + 45° + 0.8 m 宽	通过	0.02	98.8

如表 2 所示,通过本文方法实现的轮腿机器人越障控制具有良好效果。依据本文方法进行轮腿机器人越障控制能够有效实现不同高度台阶障碍、不同角度斜坡障碍、不同宽度沟渠障碍以及多种复合障碍环境情况下的轮腿机器人越障。轮腿机器人能够实现效果良好的越障过程,打滑率极小,均小于 0.1%,轮腿机器人越障运行稳定性均高于 95%,能够适应复杂环境下的越障。

为进一步评估本文方法的越障能力和稳定性,将基于集成传感器与图像处理的越障路径规划方法(文献[3]方法)、基于有限状态机与 B 样条曲线的越障控制方法(文献[4]方法)与本文方法进行对比,验证在地面湿滑程度不同的情况下,3 种越障控制方法对机器人支撑力变化的影

响。结果如图 6 所示。

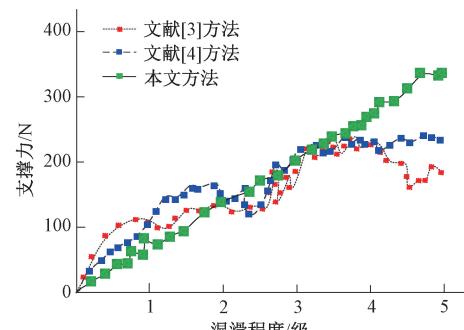


图 6 支撑力变化对比图

Fig. 6 Comparison of supporting force changes

如图 6 所示,湿滑程度被划分为 5 个等级,其中 1 级表示最干燥,5 级表示最湿滑。随着地面湿滑程度的增加,3 种方法的支撑力变化均有所增大。文献[3]方法在 5 级湿滑地面上出现较大的支撑力波动,影响稳定性。文献[4]方法通过 B 样条曲线控制,使支撑力逐渐趋于平稳,但整体支撑力表现不佳。

本文方法通过传感器融合和动态避障策略,更有效地降低了支撑力的波动。传感器融合技术能够实时获取地面湿滑程度、机器人姿态以及运动状态等多种信息,从而为动态避障策略提供准确的数据支持。在 5 级湿滑的地面上,本文方法表现出较大的支撑力,确保了机器人在越障过程中的稳定性和可靠性。

### 3 结 论

实现轮腿机器人越障控制具有重要意义。依据轮腿机器人越障控制,能够确保轮腿机器人在复杂多变的环境中稳定、高效地通过障碍物,有效提升轮腿机器人执行任务的完成率和成功率,保证轮腿机器人越障的安全运行,因此提出一种复杂环境下高运动性能轮腿机器人越障控制方法,能够实现效果较好的腿机器人越障控制,通过对复杂环境的变化进行自适应调整,能够有效提升轮腿机器人越障的稳定性。

### 参考文献

- [1] 杨洪涛,单翔飞,沈梅,等.对称悬架混联轮腿机器人结构设计与参数优化[J].机械设计,2024,41(3):65-74.  
YANG H T, SHAN X F, SHEN M, et al. Structural design and parameter optimization of symmetrical suspension hybrid wheel leg robot [J]. Mechanical Design, 2024, 41(3): 65-74.
- [2] 孟广耀,王哲,孙英暖,等.轮腿可变式移动机器人越障研究[J].计算机仿真,2023,40(3):460-466.  
MENG G Y, WANG ZH, SUN Y N, et al. Research on obstacle crossing of wheel leg variable mobile robot [J]. Computer Simulation, 2023, 40(3): 460-466.
- [3] 钟道方,田颖,张明路.轮腿式爬壁机器人的永磁吸附装置设计与优化[J].工程设计学报,2022,29(1):41-50.  
ZHONG D F, TIAN Y, ZHANG M L. Design and optimization of permanent magnet adsorption device for wheel leg wall climbing robot [J]. Journal of Engineering Design, 2022, 29(1): 41-50.
- [4] 刘宁波,张静鑫,舒莹.基于有限状态机的绝缘子检测机器人越障控制[J].机械与电子,2024,42(4):66-70.  
LIU N B, ZHANG J X, SHU Y. Obstacle crossing control of insulator detection robot based on finite state machine[J]. Mechanical and Electronic, 2024, 42(4): 66-70.
- [5] 张秀丽,赵浩宇,吴佳宁,等.四足机器人腾空跳跃的轨迹优化与控制方法[J].北京交通大学学报,2024,48(3):161-170.  
ZHANG X L, ZHAO H Y, WU J N, et al. Trajectory optimization and control method for quadruped robot jumping in the air [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(3): 161-170.
- [6] 徐显金,张奕康,颜海峰,等.高压输电线软体巡检机器人磁致动机制及 PI 滑模控制研究[J].机床与液压,2024,52(15):14-21.  
XU X J, ZHANG Y K, YAN H F, et al. Research on magnetic actuation mechanism and PI sliding mode control of high-voltage transmission line soft inspection robot [J]. Machine Tool and Hydraulic, 2024, 52(15): 14-21.
- [7] 陆钰,李丹,赵文杰.基于前馈型变论域模糊 PID 控制的智能小车轨迹跟踪方法[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2024,41(5):499-506.  
LU Y, LI D, ZHAO W J. Intelligent car trajectory tracking method based on feedforward variable domain fuzzy PID control [J]. Journal of Anhui University of Technology(Natural Science Edition), 2024, 41(5): 499-506.
- [8] 窦钰涵,张金柱,王涛,等.可分体轮腿四足机器人的运动模态分析与轨迹切换[J].太原理工大学学报,2023,54(4):748-754.  
DOU Y H, ZHANG J ZH, WANG T, et al. Modal analysis and trajectory switching of separable quadruped robots with wheel legs [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2023, 54(4): 748-754.
- [9] 辛亚先,李贻斌,柴汇,等.基于全身力矩控制的双腿轮机器人跳跃方法研究[J].自动化学报,2023,49(8):1635-1644.  
XIN Y X, LI Y B, CHAI H, et al. Research on jumping method of two leg wheel robot based on whole body torque control [J]. Journal of Automation, 2023, 49(8): 1635-1644.
- [10] 范宏斌,李路路,曹伟,等.轮-履-腿复合仿生机器人步态规划及越障性能分析[J].工程设计学报,2022,29(2):133-142.  
RUI H B, LI L L, CAO W, et al. Gait planning and obstacle crossing performance analysis of wheel shoe leg composite bionic robot [J]. Journal of Engineering Design, 2022, 29(2): 133-142.
- [11] 牛晶,申传艳,张利鹏,等.基于改进 ACO-DWA 算法的轮式植保机器人避障路径研究[J].电子测量与仪器学报,2024,38(5):188-200.  
NIU J, SHEN C H Y, ZHANG L P, et al. Research

- on obstacle avoidance path of wheeled plant protection robot based on improved ACO-DWA algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(5): 188-200.
- [12] 肖洒, 吕勇明, 吴海彬. 一种基于 DP-KMP 的机器人避障交互式学习方法 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(11): 65-78.  
XIAO S, LYU Y M, WU H B. Interactive learning approach for robot obstacle avoidance based on DP-KMP [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(11): 65-78.
- [13] 郑春雷, 殷宝麟, 杨锡军, 等. 轮腿式机器人的设计与运动仿真 [J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2022, 40(5): 75-77.  
ZHENG CH L, YIN B L, YANG X J, et al. Design and motion simulation of wheeled legged robots [J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2022, 40(5): 75-77.
- [14] 贺国平, 闫雨朋, 仇志强, 等. 电液负载敏感-变转速复合流量调节与模糊 PID 控制 [J]. 机床与液压, 2024, 52(16): 93-98.  
HE G P, YAN Y P, ZHANG ZH Q, et al. Electro hydraulic load sensitivity variable speed composite flow regulation and fuzzy PID control [J]. Machine Tool and Hydraulic, 2024, 52(16): 93-98.
- [15] 马长青, 李峰, 黄显博, 等. 基于模糊 PID 的自移式临时支架自适应控制研究 [J]. 工矿自动化, 2024, 50(12): 76-84.  
MA CH Q, LI F, HUANG Y B, et al. Research on adaptive control of self moving temporary support based on fuzzy PID [J]. Industrial and Mining Automation, 2024, 50(12): 76-84.

### 作者简介

邓广,本科,讲师,主要研究方向为自动控制技术。

E-mail:123713833@qq.com

姚江云(通信作者),硕士研究生,副教授,主要研究方向为智能控制技术。

E-mail:469849257@qq.com