2026 年 第 26 卷 第 29 期
2026, 26(29): 12679-09

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671-1815
CN 11-4688/T

DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2508939
引用格式:游景涛, 张华, 周依霖, 等. 核电钢筋绑扎移动机械臂抗倾覆控制[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(29): 12679-12687.
You Jingtao, Zhang Hua, Zhou Yilin, et al. Anti-overturning control of mobile manipulator for nuclear power rebar binding[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(29): 12679-12687.

核电钢筋绑扎移动机械臂抗倾覆控制

游景涛[1], 张华[1*], 周依霖[1], 韩文超[2]
(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 中国核工业二四建设有限公司, 绵阳 621000)

摘 要 针对核电钢筋绑扎移动机械臂在狭窄空间的倾覆稳定性问题,提出一种双边界并行倾覆力矩法(dual-boundary tip-over moment,DB-TOM)。该方法通过重构倾覆轴系优化计算流程,平均计算耗时较传统方法缩减 18.7%,满足系统毫秒级实时控制需求。构建静/动态耦合动力学模型,剖析惯性力与陀螺力矩对稳定性的影响机制。设计模糊 PID(proportional integral derivative)控制器,以关节角加速度为控制变量,建立倾覆力矩闭环反馈回路。仿真结果表明:典型连续作业工况下,系统稳态误差均值收敛至 -0.51 N·m,标准差为 0.26 N·m;引入外部阶跃负载扰动时,最大动态力矩偏差较固定增益 PID 控制下降 34%。数据验证该控制策略具备抑制力矩波动与扩大系统稳定裕度的特性,可作为移动机械臂动态作业的安全控制依据。

关键词 移动机械臂; 倾覆稳定性; 模糊 PID 控制; 倾覆力矩法; 仿真分析
中图法分类号 TP242 TH213; **文献标志码** A

Anti-overturning Control of Mobile Manipulator for Nuclear Power Rebar Binding

YOU Jing-tao[1], ZHANG Hua[1*], ZHOU Yi-lin[1], HAN Wen-chao[2]
(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
2. China Nuclear Industry 24 Construction Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

[**Abstract**] To address the overturning stability of a mobile manipulator for nuclear power rebar binding in confined spaces, a dual-boundary parallel tip-over moment method was proposed. By reconstructing the tipping-over axis system to optimize the computational flow, the average calculation time decreases by 18.7% compared to traditional methods, satisfying the millisecond-level real-time control requirements. A statically and dynamically coupled dynamic model was formulated to analyze the influence mechanisms of inertial forces and gyroscopic moments on stability. A fuzzy proportional integral derivative(PID) controller was designed with joint angular accelerations as control variables, establishing a closed-loop feedback loop for the tipping-over moment. Simulation results indicate that under typical continuous operation conditions, the mean steady-state error converges to -0.51 N·m with a standard deviation of 0.26 N·m. Upon introducing an external step load disturbance, the maximum dynamic moment deviation decreases by 34% compared to fixed-gain PID control. Data verifies that this control strategy exhibits characteristics of suppressing moment fluctuations and expanding the system stability margin, providing a safety control reference for dynamic operations of mobile manipulators.

[**Keywords**] mobile robot arm; overturning stability; fuzzy PID control; top-over moment method; simulation analysis

在核电站建造过程中,钢筋绑扎作业因人工效率低(约 25 根/h)与高风险性(事故率占 18%)成为施工瓶颈[1],研发移动机械臂自动实现钢筋安装绑扎成为必然趋势。然而,狭窄的钢筋网格环境(间距≤0.5 m)与动态作业需求使得机械臂存在倾覆稳定性问题,现有研究对此类复杂场景的适应性仍有待提高。

Borkar 等[2]总结了轮式机器人稳定性分析方法,指出需加强动态环境和多机协作研究。Tao 等[3]开发了可变形轮腿机器人,能切换模式提升越障能力。Son 等[4]设计可移动电池组,调节消防履带机器人重心,防止爬楼倾覆。钟功祥等[5]优化永磁吸附攀爬机器人设计,增强其在陡峭井架上的稳定性。宁会峰等[6]则分析了光伏除尘机械臂在倾斜路面的动态稳定性变化。Xing 等[7]以零力矩点(zero moment point,ZMP)有效区域,实现建筑机械

收稿日期: 2025-12-30 **修订日期**: 2026-03-25
基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1305305)
第一作者: 游景涛(2001—),男,汉族,福建南平人,硕士研究生。研究方向:移动机器人。E-mail:1258175432@qq.com。
* **通信作者**: 张华(1964—),男,汉族,江西余干人,博士,教授,硕士研究生导师。研究方向:移动机器人、焊接自动化。E-mail:huazhang@yeah.net。

臂毫秒级倾覆预警。然而,现有文献中提出的动态倾覆稳定性判据,包括倾覆力矩法[8]、能量稳定裕度[9]、零力矩点法[10]、稳定锥方法[11]、力-角稳定性度量法[12]以及质心-支撑区域法[13]等,本质上仍是在静态稳定性框架中引入速度、加速度或外力扰动项的扩展,在核电狭窄空间等特定复杂动态场景下适应性不足。尤其在核电站钢筋绑扎场景中,这些方法的局限性尤为突出:狭窄的钢筋网格(间距≤0.5 m)与末端的高频运动形成的动态耦合效应,使得 ZMP 等传统判据因忽略陀螺力矩与惯性力耦合导致预测精度下降,而倾覆力矩(tip-over moment,TOM)的高计算复杂度又难以满足核电施工毫秒级实时控制需求。

针对核电狭窄空间作业中的倾覆稳定性问题,开展分析与控制策略研究。建立静/动态耦合的倾覆动力学模型,系统揭示惯性力与陀螺力矩对稳定性的影响机制。提出一种改进的双边界并行倾覆力矩法(dual-boundary TOM,DB-TOM),通过重构倾覆轴系与力矩投影关系,显著降低计算复杂度,提升判别效率。设计一种模糊 PID(proportional integral derivative)控制器,通过实时调整关节角加速度,实现对倾覆力矩的精确闭环控制,以克服传统 PID 在非线性系统中的局限性。依托 MATLAB 平台建立仿真环境,在连续作业与外部阶跃载荷工况下,测试上述控制架构对系统倾覆力矩的跟随性能与状态响应特征。

1 移动机械臂系统组成

抓举机器人(样机如图 1 所示)主要由履带移动平台、液压升降平台、六轴机械臂(具体参数如表 1所示)、钢筋液压夹取机构、四液压支腿系统及电气控制系统组成。系统需实现以下功能:移动定位、钢筋抓取与抬举、绑扎位姿调整、液压支腿稳定支撑及远程控制操作。具体作业流程如下。

图 1 移动机械臂样机

Fig. 1 Mobile robotic arm prototype

表 1 机械臂规格参数

Table 1 Robotic arm specifications

关节	质量/kg	动作范围/(°)	最大动作速度/[(°)·s^{-1}]
关节 1	317	±180	120
关节 2	310	−60 ~ +80	95
关节 3	229	−95 ~ +80	95
关节 4	150	±200	160
关节 5	30	±125	150
关节 6	30	±360	220

步骤 1 遥操作移动至作业位置。操作人员通过远程示教器控制履带移动平台,行进至目标绑扎区域。双侧液压马达独立驱动,确保在不平整地面具备高通过性。

步骤 2 液压支腿展开与平台稳定。启动对称布置的四液压支腿系统,独立液压缸驱动支腿向下伸展。支腿接触地面后施加预紧力,抬升履带离地,降低重心、增大支撑面积,显著提升静态稳定性。

步骤 3 钢筋抓取与定位。操作人员通过无线遥控器操控六轴机械臂,使末端液压夹爪抵达目标钢筋位置。机械臂由伺服电机驱动各关节运动;夹爪采用双 V 形齿状结构,在液压驱动下以最大夹持力锁紧钢筋。

步骤 4 钢筋绑扎位姿调整。

平行地面绑扎:关节 1 ~ 关节 3 协同运动将钢筋水平抬升至目标高度,关节 4 ~ 关节 6 微调末端姿态,确保与已有网格平行对齐。

垂直地面绑扎:液压升降平台举升机械臂至作业高度,关节 6 驱动夹爪旋转 90°,使钢筋垂直,随后关节 2 ~ 关节 4 调整空间位姿完成定位。

该流程实现了从远程移动、平台稳定、钢筋抓取到最终绑扎位姿调整的全过程自动化作业。

2 倾覆稳定性判据

任意情况下,倾覆力矩(TOM)[14]对任意倾覆边界的数学模型均可表述为

$$\mathrm{TOM} = (\boldsymbol{G}_y \times \boldsymbol{r}_y)\,\boldsymbol{e}_{ii+1} + (\boldsymbol{F}_1 \times \boldsymbol{r}_{1i})\,\boldsymbol{e}_{ii+1} + (\boldsymbol{F}_1 \times \boldsymbol{r}_{ii+1})\,\boldsymbol{e}_{ii+1} + \boldsymbol{n}_1\,\boldsymbol{e}_{ii+1} \tag{1}$$

式(1)中:TOM 为系统相对于倾覆边界 $ii+1$ 的倾覆力矩;$\boldsymbol{G}_y$为移动平台的整体重力矢量;$\boldsymbol{r}_y$为平台重力作用点(质心)到倾覆边界线 $ii+1$ 的位置矢量;$\boldsymbol{e}_{ii+1}$为沿倾覆边线 $ii+1$ 的单位方向向量;$\boldsymbol{F}_1$为机械臂关节 1(基座)上所受的空间力矢量;$\boldsymbol{r}_{1i}$为关节 1 受力点到倾覆边界线 $ii+1$ 的位置矢量;$\boldsymbol{n}_1$为机械臂关节 1 所受空间力矩矢量。

由式(1)可知,第一项为移动平台重力对倾覆边界的力矩,第二项为关节 1 上所受力对倾覆边界中心点的力矩,第三项为关节 1 上所受力作用在倾

覆边界中心点后的力对倾覆边线的力矩,第四项为关节 1 上所受力矩对倾覆边线的投影。

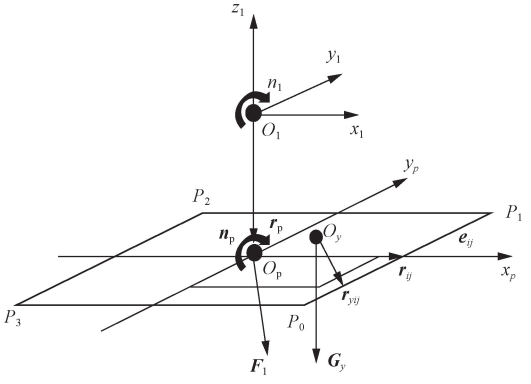
2.1　传统倾覆力矩法(TOM)及其局限性

首先,需要明确移动机械臂在支撑多边形上的受力情况,作为后续分析的基础。系统力学模型如图 2 所示,移动平台受多维度力/力矩作用。其中,P_i与 P_j为液压支腿与地面的接触点,二者形成倾覆轴线 e_{ij},4 个倾覆轴线所围成的面为倾覆轴面。

传统倾覆力矩法通过计算机械臂动力学对机器人支撑多边形各边界的力矩来评估稳定性。对于图 5 所示的四支腿系统,需分别计算绕 4 条倾覆边界线($\boldsymbol{e}_{01}$,$\boldsymbol{e}_{12}$,$\boldsymbol{e}_{23}$,$\boldsymbol{e}_{30}$)的力矩 TOM,系统的稳定裕度由最小值决定,即

$$\mathrm{TOM} = \min(\mathrm{TOM}_{01},\mathrm{TOM}_{12},\mathrm{TOM}_{23},\mathrm{TOM}_{30}) \tag{2}$$

然而,该方法存在固有局限性:必须完成全部 4 个边界的复杂力矩投影计算后,才能通过比较得出结果。这种“计算-比较”模式在动态环境中产生了巨大的计算冗余,因为系统通常只对某一两个边界构成实质性威胁,难以满足毫秒级实时控制的需求。



O_y为移动平台重心点;$\boldsymbol{G}_y$为平台重力矢量;$\boldsymbol{r}_{yij}$为 O_y至 $\boldsymbol{e}_{ij}$的法向矢量;O_1为机械臂基座原点;O_p为倾覆轴面几何中心点;$\boldsymbol{r}_p$为 O_1至 O_p的矢量;$\boldsymbol{n}_p$为 $\boldsymbol{F}_1$对 O_p的力矩;$\boldsymbol{r}_{ij}$为 O_p至 $\boldsymbol{e}_{ij}$的法向矢量

图 2　机械臂系统上的各力/力矩

Fig. 2　Forces/moments on the manipulator system

2.2　双边界并行倾覆力矩法(DB-TOM)的重构原理

传统 TOM 方法需遍历计算支撑多边形全部 4 个边界的力矩。基于移动底盘矩形拓扑的对称特征,提出双边界并行倾覆力矩法(DB-TOM),通过提取预判因子解耦稳定性判别逻辑,将力矩计算维度从四边界简化为双边界。

2.2.1　平行边界的动力学解耦与预测因子提取

由于移动底盘的矩形拓扑特征,系统在任意时刻必定沿某一对互相平行的轴线(如 X 轴或 Y 轴方向)存在最危险倾覆趋势。以 X 方向的平行边界 i_0 i_1与 i_2i_3为例,假设系统向 i_0i_1边界倾覆的概率更高,则必然满足条件为

$$\mathrm{TOM}_{01} < \mathrm{TOM}_{23} \tag{3}$$

将普遍公式代入上述进行展开。由于边界 i_0i_1与 i_2i_3相互平行,其单位方向矢量在局部坐标系下具有共线性(即 $\boldsymbol{e}_{01} = \boldsymbol{e}_{23} = \boldsymbol{e}_x$),且 $\boldsymbol{r}_{1i}$为基坐标系原点至倾覆轴面几何中心的法向量。因此,机械臂对中心的动态扰动项在两条平行边界上的投影是等效的,即存在恒等式为

$$(\boldsymbol{F}_1 \times \boldsymbol{r}_{1i})\,\boldsymbol{e}_{01} + \boldsymbol{n}_1\,\boldsymbol{e}_{01} = (\boldsymbol{F}_1 \times \boldsymbol{r}_{1i})\,\boldsymbol{e}_{23} + \boldsymbol{n}_1\,\boldsymbol{e}_{23} \tag{4}$$

利用这一共线特征对不等式进行移项化简,将包含 $\boldsymbol{F}_1$、$\boldsymbol{n}_1$的共同项提取至不等式左侧,得

$$(\boldsymbol{F}_1 \times \boldsymbol{r}_{1i})\,\boldsymbol{e}_{01} + \boldsymbol{n}_1\,\boldsymbol{e}_{01} < -\frac{(\boldsymbol{F}_1 \times \boldsymbol{r}_{01} + \boldsymbol{G}_y \times \boldsymbol{r}_{y01})\,\boldsymbol{e}_{01}}{2} - \frac{(\boldsymbol{F}_1 \times \boldsymbol{r}_{23} + \boldsymbol{G}_y \times \boldsymbol{r}_{y23})\,\boldsymbol{e}_{23}}{2} \tag{5}$$

2.2.2　物理量化与阈值判据

上述不等式不仅在数学上实现了降维,更具有明确的物理意义。令不等式左侧为倾覆趋势预测因子 X_1,右侧为临界值 C_1,则有

$$C_1 = -\frac{(\boldsymbol{F}_1 \times \boldsymbol{r}_{01} + \boldsymbol{G}_y \times \boldsymbol{r}_{y01})\,\boldsymbol{e}_{01}}{2} - \frac{(\boldsymbol{F}_1 \times \boldsymbol{r}_{23} + \boldsymbol{G}_y \times \boldsymbol{r}_{y23})\,\boldsymbol{e}_{23}}{2} \tag{6}$$

$$X_1 = (\boldsymbol{F}_1 \times \boldsymbol{r}_{ii+1})\,\boldsymbol{e}_{01} + \boldsymbol{n}_1\,\boldsymbol{e}_{01} \tag{7}$$

在动力学层面,预测因子 X_1本质上表征了机械臂(主要动态扰动项)在底盘 X 轴主方向上产生的交变倾覆力矩等效投影;而临界值 C_1为由底盘重力分布与支腿几何跨度构成的恢复力矩阈值。

根据动态扰动与恢复力矩的映射关系,建立 X 轴方向临界边界的判定条件。

当 $X_1 < C_1$时,判定 $\boldsymbol{e}_{01}$为 X 方向危险边线,倾覆力矩取 $\mathrm{TOM}_x = \mathrm{TOM}_{01}$。

当 $X_1 > C_1$时,判定 $\boldsymbol{e}_{23}$为 X 方向危险边线,为统一稳定性判据的符号准则,定义 $\mathrm{TOM}_x = -\mathrm{TOM}_{23}$。

同理,对于 Y 轴方向的平行边界 $\boldsymbol{e}_{12}$与 $\boldsymbol{e}_{30}$,定义预测因子 X_2与临界值 C_2。

当 $X_2 < C_2$时,判定 $\boldsymbol{e}_{12}$为 Y 方向危险线,倾覆力矩取 $\mathrm{TOM}_y = \mathrm{TOM}_{12}$。

当 $X_2 > C_2$时,判定 $\boldsymbol{e}_{30}$为 Y 方向危险线,为统一稳定性判据的符号准则,定义 $\mathrm{TOM}_y = -\mathrm{TOM}_{30}$。

2.2.3　并行计算与最终判别

基于上述预判逻辑,系统并行求解目标危险边界对应的倾覆力矩 TOM_x与 TOM_y。建立稳定性判

据如下。

判据 1:若 $\min(\mathrm{TOM}_x, \mathrm{TOM}_y) < 0$,系统发生倾覆。

判据 2:若 $\min(\mathrm{TOM}_x, \mathrm{TOM}_y) \geqslant 0$,系统处于安全状态。

该判据体系利用法向矢量与力矩变量的符号映射特性,以双边界并行计算替代四边界遍历求解,降低算法的时间复杂度。

3 模糊 PID 控制器设计

3.1 基于灵敏度加权的关节角加速度分配控制策略

3.1.1 倾覆力矩与关节加速度的线性映射

为建立单个关节角加速度与系统倾覆力矩(TOM)之间的数学关系,并进一步实现基于 TOM 的关节加减速控制,需对机械臂动力学方程进行系统分解。首先,将作用在关节 1 上的总力矩分解为

$$\boldsymbol{n}_1 = \boldsymbol{n}_{1\alpha} + \boldsymbol{n}_{1\omega} \tag{8}$$

式(8)中:$\boldsymbol{n}_{1\alpha}$为角加速度在关节 1 上引起的力矩;$\boldsymbol{n}_{1\omega}$为角速度在关节 1 上引起的力矩。

为计算单个关节角加速度在关节 1 上引起的力/力矩,研究采用运动学外推方法逐关节计算运动传递。对于关节 i,其角加速度 α_i所产生各连杆的角加速度及其质心处的线加速度如下。

对自身关节连杆产生的角加速度与质心处的线加速度为

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_i^i = \alpha_i (0,0,1)^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

$$\dot{\boldsymbol{v}}_i^i = 0 \tag{10}$$

$$\dot{\boldsymbol{v}}_{ci}^i = \dot{\boldsymbol{\omega}}_i^i \times \boldsymbol{p}_{ci}^i \tag{11}$$

式中:$\boldsymbol{p}_{ci}^i$为关节 i 对应杆件质心指向关节 i 的向量。

对关节 $i+1$ 连杆的角加速度与质心处的线加速度为

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i+1}^{i+1} = \boldsymbol{R}_i^{i+1} \dot{\boldsymbol{\omega}}_i^i \tag{12}$$

$$\dot{\boldsymbol{v}}_{i+1}^{i+1} = \boldsymbol{R}_i^{i+1} \dot{\boldsymbol{\omega}}_i^i \times \boldsymbol{p}_{i+1}^i \tag{13}$$

$$\dot{\boldsymbol{v}}_{(ci+1)}^{i+1} = \dot{\boldsymbol{v}}_{i+1}^{i+1} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{i+1}^{i+1} \times \boldsymbol{p}_{c(i+1)}^{i+1} \tag{14}$$

式中:$\boldsymbol{p}_{i+1}^i$为关节 $i+1$ 指向关节 i 的向量。

对关节 $i+2$ 及其后续关节的连杆的角加速度与质心处的线加速度为

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i+2}^{i+2} = \boldsymbol{R}_{i+1}^{i+2} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{i+1}^{i+1} \tag{15}$$

$$\dot{\boldsymbol{v}}_{i+2}^{i+2} = \boldsymbol{P}_{i+1}^{i+2} (\dot{\boldsymbol{v}}_{i+1}^{i+1} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{i+1}^{i+1} \times \boldsymbol{p}_{i+2}^{i+1}) \tag{16}$$

$$\dot{\boldsymbol{v}}_{c(i+2)}^{i+2} = \dot{\boldsymbol{v}}_{i+2}^{i+2} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{i+2}^{i+2} \times \boldsymbol{p}_{c(i+2)}^{i+2} \tag{17}$$

对其前各关节连杆引起的角加速度与质心处的线加速度均为 0。

计算出每个连杆质心的线加速度和角加速度后,运动牛顿方程和欧拉方程就可以计算出作用在连杆质心上的惯性力和力矩为

$$\boldsymbol{F}_i^i = m_i \boldsymbol{v}_{ci}^i \tag{18}$$

$$\boldsymbol{N}_i^i = \boldsymbol{I}_{ci} \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \tag{19}$$

在求出各杆惯性力和力矩后可计算对应的关节力矩为

$$\boldsymbol{f}_i^i = \boldsymbol{R}_{i+1}^i \boldsymbol{f}_{i+1}^{i+1} + \boldsymbol{F}_i^i \tag{20}$$

$$\boldsymbol{n}_i^i = \boldsymbol{N}_i^i + \boldsymbol{R}_{i+1}^i \boldsymbol{n}_{i+1}^{i+1} + \boldsymbol{p}_{ci}^i \times \boldsymbol{F}_i^i + \boldsymbol{p}_{i+1}^i \times \boldsymbol{R}_{i+1}^i \boldsymbol{f}_{i+1}^{i+1} \tag{21}$$

通过将上述所有关节力矩沿连杆结构向内递推至基座(关节 1),可求得关节 i 角加速度 α_i在关节 1 处引起的合力与合力矩。

随后,基于前述推导的 TOM 表达式,将各关节角加速度 α_i作为变量,在当前关节角度已知的条件下,可建立 TOM 随 α_i变化的解析关系式为

$$\mathrm{TOM}_{\alpha_i} = k\alpha_i + b \tag{22}$$

3.1.2 基于任务优选的力矩分配机制

在实际核电作业中,机械臂末端(关节 4 ~ 关节 6)通常用于执行精细绑扎任务,频繁的加减速调整可能会影响作业精度。相反,根部关节(如关节 2、关节 3)具有较大的转动惯量和驱动力矩,是调节系统重心和倾覆力矩的主要执行机构。

因此,为了实现“任务-稳定”解耦,提出一种基于选择矩阵的加权分配策略。

由式(22)可知,倾覆力矩 TOM 与关节角加速度 α 呈线性关系。定义 S_i为第 i 个关节的倾覆灵敏度系数(tipping sensitivity coefficient),即单位角加速度变化引起的倾覆力矩变化量为

$$S_i = \frac{\partial(\mathrm{TOM})}{\partial \alpha_i} \tag{23}$$

为了灵活指定参与抗倾覆调整的关节,引入关节选择因子 $\lambda_i \in \{0,1\}$。当 $\lambda_i = 1$ 时,表示该关节被激活参与稳定性控制;当 $\lambda_i = 0$ 时,该关节保持原运动轨迹不变。

$$\gamma_i = \frac{\lambda_i |S_i|}{\sum_{j=1}^{n} (\lambda_j |S_j|)} \tag{24}$$

式(24)中:n 为关节总数。式(24)确保了总调整量 ΔTOM 仅在被选定的关节集合中进行分配,且灵敏度(或贡献度)越大的关节承担的调整量越大。

基于该分配系数,将所需的总扭矩调整量 ΔTOM 按各关节的贡献比例进行分配,即

$$\Delta\mathrm{TOM}_{\alpha_i} = \gamma_i \Delta\mathrm{TOM}_{\alpha} \tag{25}$$

进一步,结合 TOM 随 α_i变化的解析关系式,可求解各关节所需的角加速度调整量为

$$\Delta a_i = \frac{\Delta \mathrm{TOM}_{\alpha_i} - b}{k} \tag{26}$$

基于上述建立的解析关系,可设计相应的 PID 控制器,通过动态调节各关节的角加速度,实现对 TOM 的精确闭环控制,确保系统稳定运行。

3.2　基于模糊 PID 的控制器设计

3.2.1　模糊化接口设计

模糊 PID 控制器以 TOM 的误差 e_r 和误差变化率 e_c 作为输入变量,通过模糊推理实时调整 PID 控制器的比例系数 K_p、积分系数 K_i 和微分系数 K_d,从而实现对关节角加速度的精确控制,抑制倾覆力矩波动[15]。

设定输入变量 e_r 的物理论域为[-10 000, 10 000],e_c 的物理论域为[-5 000,5 000],输出变量 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 的物理论域分别为[0,1]、[0,0.5]、[0,0.6]。所有变量的模糊论域统一为[-3,3],并划分为 7 个模糊等级:{负大(NB),负中(NM),负小(NS),零(ZO),正小(PS),正中(PM),正大(PB)}。

采用三角形隶属度函数对输入输出变量进行模糊化,其数学表达式为

$$\mu_{A_i}(q_r) = \begin{cases} \dfrac{q_r - a_i}{a_{i+1} - a_i}, & q_r \in [a_i, a_{i+1}] \\ \dfrac{a_{i+2} - q_r}{a_{i+2} - a_{i+1}}, & q_r \in [a_{i+1}, a_{i+2}] \end{cases} \tag{27}$$

式(27)中:a_i、a_{i+1}、a_{i+2} 为第 i 个模糊子集隶属函数的 3 个特征点。

该函数计算简便、响应迅速,且满足模糊划分的完备性与一致性要求[16]。

3.2.2　模糊控制规则确定与推理

模糊控制规则基于专家经验与系统动态特性设计,采用"IF e_r is A AND e_c is B THEN ΔK_p is C, ΔK_i is D, ΔK_d is E"形式的条件语句构建模糊规则库[17]。

(1)K_p 调整原则:当 e_r 较大时,增大 K_p 以提高响应速度;当 e_r 较小时,减小 K_p 以抑制超调;当 e_c 与 e_r 同号时增大 K_p,异号时减小 K_p。

(2)K_i 调整原则:当 e_r 较大时减小 K_i 防止积分饱和;当 e_r 较小时增大 K_i 以消除静差。

(3)K_d 调整原则:当 e_c 较大时增大 K_d 以抑制超调;当 e_c 较小时减小 K_d 以避免振荡。

基于上述原则,建立 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 的模糊规则表,分别如表 2 ~ 表 4 所示。

3.2.3　解模糊化接口设计

模糊推理输出的 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 为模糊量,需通过解模糊化转换为精确量。研究采用重心法进行解模糊化,其计算公式为

$$c = \frac{\sum_{k=1}^{7} \mu_c(c_k) c_k}{\sum_{k=1}^{7} \mu_c(c_k)} \tag{28}$$

式(28)中:c_k 为输出模糊论域值;$\mu_c(c_k)$ 为对应隶属度。

最终,PID 控制器参数按式(29)在线修正,表达式为

$$\begin{cases} K_p(k) = K_p(k-1) + \Delta K_p \\ K_i(k) = K_i(k-1) + \Delta K_i \\ K_d(k) = K_d(k-1) + \Delta K_d \end{cases} \tag{29}$$

该模糊 PID 控制器结构如图 3 所示,通过实时感知系统动态特性,实现参数自适应调整,既保留了传统 PID 的结构简洁性,又具备适应非线性、时变系统的能力,显著提升了倾覆力矩的控制精度与系统稳定性。

表 2　K_p 模糊规则表

Table 2　K_p fuzzy rule table

e_r \ e_c	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 3　K_i 模糊规则表

Table 3　K_i fuzzy rule table

e_r \ e_c	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	PS	ZO	ZO
NS	NB	NM	PM	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 4　K_d 模糊规则表

Table 4　K_d fuzzy rule table

e_r \ e_c	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

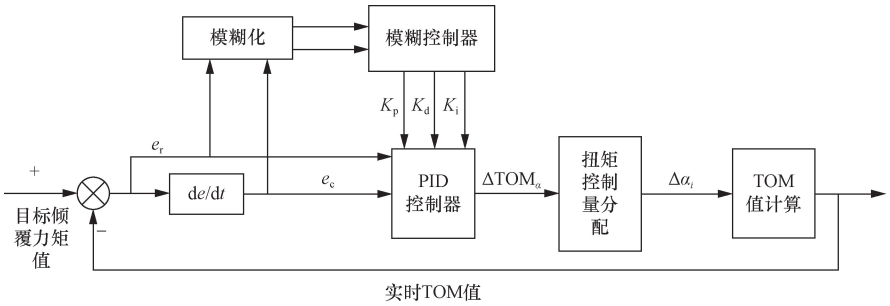


图 3 基于模糊 PID 控制器的 TOM 控制流程

Fig. 3 TOM control flow based on fuzzy PID controller

4 仿真实验

4.1 仿真参数与参数设置

为全面评估所提方法的性能,采用 MATLAB R2023a/Simulink 平台,对移动机械臂的动力学与控制进行了联合仿真。仿真采用固定步长 ODE4 求解器(步长 1 ms),机械臂动力学基于 Newton-Euler 递推算法建模,地面建模为刚性平面,忽略关节摩擦与地面滑移。硬件平台为 Intel i9-12900HX 处理器、16 GB RAM。

控制器参数设置如下。

模糊 PID:输入变量 $e_r \in [-10\ 000, 10\ 000]$,$e_c \in [-5\ 000, 5\ 000]$;输出变量 $\Delta K_p \in [0,1]$,$\Delta K_i \in [0,0.5]$,$\Delta K_d \in [0,0.6]$;初始 PID 参数为 $K_p = 0.5$,$K_i = 0.15$,$K_d = 0.03$。

传统 PID 控制器(对比基准):采用固定增益策略,作为评估模糊 PID 动态性能提升幅度的基准线。

参数整定说明:为了确保对比的科学性,传统 PID 的控制参数是通过试错法(trial-and-error method)在机器人的标称工况(即典型伸展姿态且无外部扰动)下进行的优化整定。

针对基准 PID 控制器的参数匹配,对比实验未采用遗传算法(genetic algorithm,GA)或粒子群优化(particle swarm optimization,PSO)等全局寻优算法。动力学层面上,移动机械臂执行连续作业时,关节位型变化导致系统等效转动惯量与重力矩呈现非线性时变特征。传统 PID 本质为线性固定增益控制器;若通过离线寻优获取针对特定轨迹的最优参数解,在机械臂切换作业位姿或受外部扰动时,固定增益机制易引发控制系统模型失配,即单一积分增益 K_i 难以消除稳态误差。故在该类非线性时变系统中,基准控制器的性能受制于其固定结构,而非参数整定算法。基于此物理约束,引入模糊逻辑机制,依据实时误差状态动态映射 PID 增益,以匹配被控对象的时变参数特性。

4.2 DB-TOM 计算效率验证

为客观评估 DB-TOM 算法的计算优势,设计了多场景效率对比实验。在匀速、正弦激励及阶跃响应 3 种典型工况下,分别采用传统 TOM(遍历四边界)与 DB-TOM(双边界并行)进行 1 000 次稳定性判别循环,并记录单次计算耗时。

统计结果(如图 4 所示)表明,DB-TOM 方法在各场景下的计算耗时均显著低于传统方法($P < 0.01$),平均计算效率提升了约 18.7%。

差异性分析:理论上,DB-TOM 将核心边界计算量从 4 条减少至 2 条,应带来 50% 的效率提升。实际增益(18.7%)低于理论预期的主要原因在于算法引入了“预判因子”(X, C) 的计算开销。然而,这一策略本质上是用低复杂度的代数运算置换了高复杂度的动力学矩阵求解。对于算力受限的嵌入式控制器而言,这近 20% 的算力余量至关重要,它在保证毫秒级实时响应的同时,也为系统运行更高频率的安全监测提供了可能。

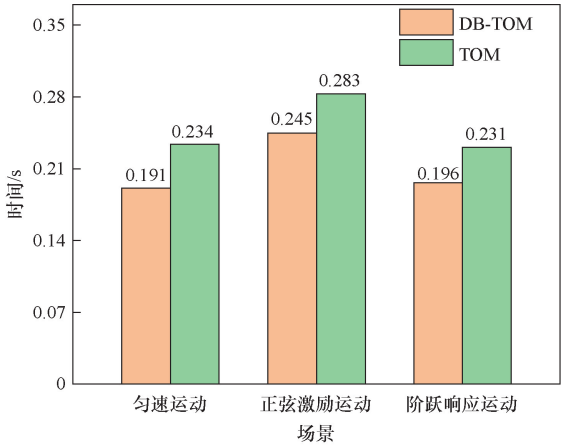


图 4 DB-TOM 方法与传统 TOM 方法仿真耗时对比

Fig. 4 Comparison of simulation time consumption between DB-TOM method and traditional TOM method

4.3 模糊控制性能仿真

为验证第 3 章所设计的模糊 PID 控制器的有效

性,在 MATLAB/Simulink 平台上构建了移动机械臂的联合仿真模型。仿真核心旨在检验控制器在典型作业轨迹下,对不同目标倾覆力矩(TOM)的跟踪能力、稳态精度及抗干扰鲁棒性。

4.3.1　理想轨迹下的跟踪性能

设定机械臂关节运动轨迹为:关节 1(0°→90°)、关节 2(0°→60°)、关节 3(30°→60°),仿真时长 60 s。选取 20 000、22 500、25 000 N·m 三个典型目标 TOM 值,对比传统 PID 与模糊 PID 的控制效果。性能指标如表 5 所示,跟踪曲线对比如图 5 ~ 图 7 所示。

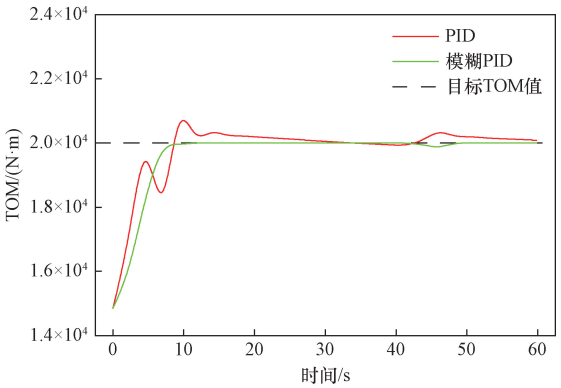


图 5　目标值为 20 000 N·m 时的仿真结果对比

Fig. 5　Comparison of simulation results with a target value of 20 000 N·m

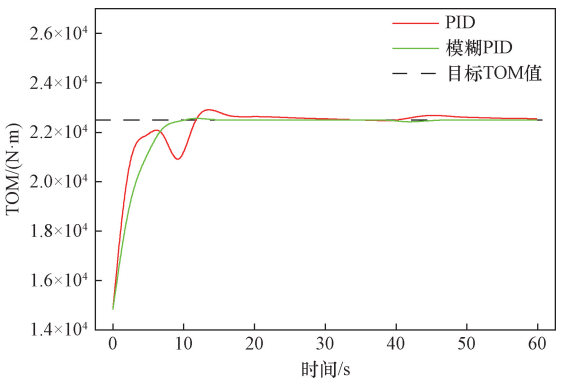


图6　目标值为 22 500 N·m 时的仿真结果对比

Fig. 6　Comparison of simulation results with a target value of 22 500 N·m

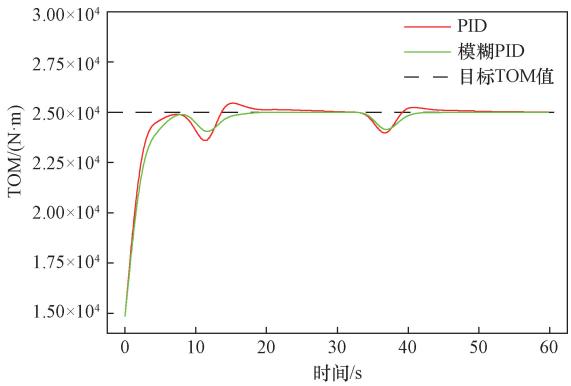


图7　目标值为 25 000 N·m 时的仿真结果对比

Fig. 7　Comparison of simulation results with a target value of 25 000 N·m

仿真结果表明,模糊 PID 在所有工况下均能稳定跟踪目标 TOM 超调量最大降幅达 7.187%,调节时间缩短 8.4 s;稳态误差均值与波动范围显著降低,说明其具备更好的抗干扰与自适应能力。

4.3.2　抗扰动鲁棒测试

为考核系统在恶劣工况下的可靠性,仿真引入了高斯白噪声($\mu = 0$ N·m, $\sigma^2 = 100$ N·m)及 1 000 N·m的外部阶跃突变($t = 45$ s)。结果如图 8 所示。

在持续的信号噪声干扰下,常规 PID 滤波能力匮乏,输出呈现剧烈波动(标准差 118.92 N·m),且伴有 5.07% 的超调。而 DB-TOM 模糊策略利用自适应增益有效抑制了高频杂波,将标准差显著降至 48.59 N·m,稳态误差均值收敛至 -13.32 N·m,保证了力矩输出的平滑与稳定。

面对 45 s 时的剧烈负载冲击,改进策略展现了卓越的抗扰刚度,将最大偏差限制在1 114.17 N·m,较常规方案(偏差 1 694.77 N·m)降低了约 34%。更关键的是,干扰撤除后,常规 PID 仍残留 99.46 N·m 的静差,而改进策略迅速回正,最终残差仅为 1.72 N·m,实现了近乎无损的精确恢复。

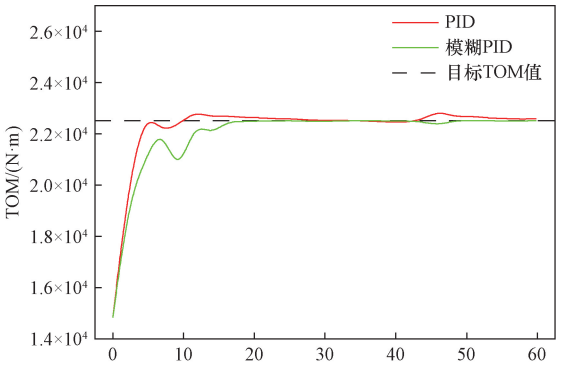
4.3.3　连续作业任务仿真

为验证所提控制策略在模拟实际核电钢筋绑扎连续、多阶段作业中的有效性,设计了包含多个典

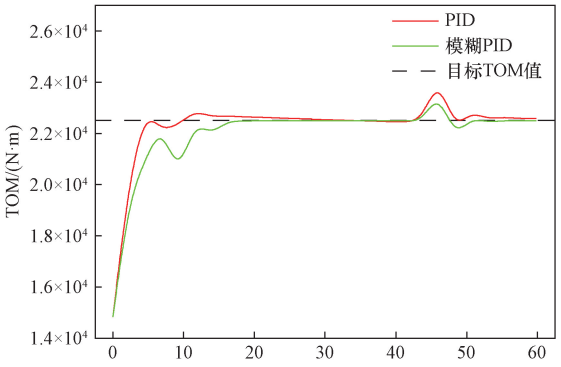
表 5　不同控制策略下的 TOM 控制性能指标

Table 5　Performance indicators of TOM control under different strategies

目标 TOM/(N·m)	控制策略	超调量/%	调节时间/s	稳态误差均值/(N·m)	稳态误差标准差/(N·m)
25 000	传统 PID	7.210	17.8	119.28	139.19
	模糊 PID	0.023	10.1	0.03	37.94
22 500	传统 PID	2.910	22.1	66.50	62.68
	模糊 PID	0.203	13.7	1.99	25.78
20 000	传统 PID	2.416	25.8	95.12	92.39
	模糊 PID	0.020	19.5	-21.36	73.21



(a) 引入高斯白噪声



(b) 引入外部阶跃突变力矩

图 8 抗扰动鲁棒仿真结果对比

Fig. 8 Comparative analysis of disturbance-resistant robust simulation results

型动作的连续任务仿真,结果如图 9 所示。该任务模拟机械臂从抓取钢筋、水平搬运到精确插入网格的完整流程,旨在考核 DB-TOM 判别机制与模糊 PID 控制器在动态变化、连续指令下的综合性能,性能指标对比如表 6 所示。

仿真设定机械臂需依次完成两个连续的姿态调整,对应的关节角目标序列如下。

初始/抓取姿态:[90°, -80°, -15°, 0°, -5°, 0°]。

抬升/平移姿态:[90°, 0°, 0°, 0°, 0°, 0°]。

精细调整/放置姿态:[0°, -18°, 18°, 0°, 0°, 0°]。

为验证模糊 PID 在连续作业中的综合性能,在 120 s 仿真周期内,对机械臂从快速搬运到精细操作的全流程进行了量化对比。

在动作切换的瞬态响应上,常规 PID 控制因缺乏工况感知,在趋近目标值(29 000 N·m)时产生 2.45% 的超调,存在刚性碰撞隐患。相比之下,模糊 PID 策略能够实时识别“精细调整”需求并优化增益,将超调量严格限制在 0.31%,实现了各阶段的平滑过渡与软着陆。

针对核电钢筋绑扎的毫米级精度要求,以 0.5% 误差带(28 855 ~ 29 145 N·m)衡量系统收敛速度,改进策略得益于变参数调节,仅需 18 s 即可锁定在目标域内,较常规方案的 51 s 调节时间缩短了约 65%,大幅减少了单次作业的无效等待。

进入最终稳态后,实验组数据进一步展现了卓越的抗干扰能力。与对照组存在 -6.51 N·m 平均静差及7.38 N·m 的标准差相比,改进算法将稳态误差均值缩小至 -0.51 N·m,标准差降至 0.26 N·m,确立了“零静差、低抖动”的输出特性,充分满足复杂环境下高精度作业的需求。

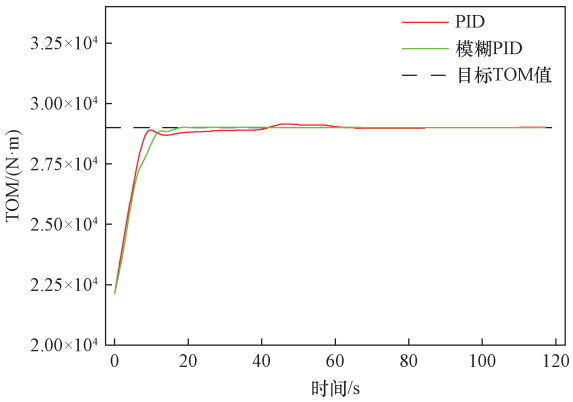


图 9 连续作业仿真结果对比

Fig. 9 Comparative analysis of continuous operation simulation results

表 6 连续作业任务性能指标对比

Table 6 Performance comparison for the continuous operation task

控制策略	超调量/%	调节时间/s	稳态误差均值/(N·m)	稳态误差标准差/(N·m)
传统 PID	2.45	51	-6.51	7.38
模糊 PID	0.31	18	-0.51	0.26

5 结论

针对核电钢筋绑扎移动机械臂的倾覆稳定性问题,研究提出了一种双边界并行倾覆力矩法与模糊 PID 控制策略,并通过仿真实验验证了该策略的有效性。主要结论如下。

(1)DB-TOM 方法通过重构倾覆轴系与预判机制,将计算效率提升 18% ~19%,满足毫秒级实时判别需求。

(2)模糊 PID 控制器在典型作业轨迹下,超调量降低了 87% 以上,并将稳态误差标准差收敛至 0.26 N·m,显著优于传统 PID。

(3)抗扰动测试表明模糊 PID 在阶跃力矩与传感器噪声下仍保持强鲁棒性。

(4)现阶段研究依赖仿真平台进行理论验证,

未开展实物样机实验。实际物理系统中固有的关节非线性摩擦、传感器测量噪声及底盘与环境的柔性接触特性,构成现有理想刚性模型中的未建模动力学扰动,导致理论稳定裕度与实际物理边界存在映射偏差。后续工作计划在物理样机部署该算法,引入接触力观测机制标定真实物理边界条件,以评估系统在物理工况下的闭环鲁棒性。

综上所述,针对核电钢筋绑扎移动机械臂的倾覆稳定性约束,所构建的 DB-TOM 判定机制与模糊 PID 闭环控制架构,兼顾算法执行效率与动态力矩跟踪精度。该控制策略依托对交变倾覆力矩的平抑机制,拓宽了系统的物理稳定边界,可为狭窄受限空间内移动机械臂的动态安全作业提供工程参考。

参 考 文 献

[1] 殷广师. “华龙一号”大型钢筋笼模块化施工技术研究及应用[J]. 中国核电, 2022, 15(6): 779-783.
Yin Guangshi. Study and application of modular construction technology for large reinforcement cages in “Hualong One”[J]. China Nuclear Energy, 2022, 15(6): 779-783.

[2] Borkar K K, Aljrees T, Pandey K S, et al. Stability analysis and navigational techniques of wheeled mobile robot: a review[J]. Processes, 2023, 11(12): 3302.

[3] Tao Y, Gao C Y, Shi Y S, et al. Analysis of motion characteristics and stability of mobile robot based on a transformable wheel mechanism[J]. Applied Sciences, 2022, 12(23): 12348.

[4] Son H, Bay K V, Anh T P N, et al. Research on the overturning phenomenon of firefighting and rescue crawler robots when climbing up and down stairs[J]. International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 2024, 9(2): 1-17.

[5] 钟功祥, 宋华, 严鹏, 等. 井架攀爬机器人设计与抗倾覆分析[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(6): 840-848.
Zhong Gongxiang, Song Hua, Yan Peng, et al. Design and anti-overturning analysis of a derrick-climbing robot[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2022, 41(6): 840-848.

[6] 宁会峰, 周晓虎, 杨从尧. 面向光伏电站除尘作业的移动机械臂抗倾覆稳定性研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(8): 377-384.
Ning Huifeng, Zhou Xiaohu, Yang Congyao. Anti-overturning stability of a mobile manipulator for photovoltaic power station dust-cleaning operations[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(8): 377-384.

[7] Xing H, Li T, Liu J. Working space planning for wheeled robot overturning stability[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2842(1): 012103.

[8] 段志国, 傅伯雄, 耿庆琳, 等. 基于 Recurdyn 的移动机器人倾覆性分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(17): 7401-7406.
Duan Zhiguo, Fu Boxiong, Geng Qinglin, et al. Overturning analysis of a mobile robot based on Recurdyn[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(17): 7401-7406.

[9] Kamezaki M, Kokudo Y, Uehara Y, et al. Predictive energy stability margin: prediction of heavy machine overturning considering rotation and translation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2025, 10(4): 3286-3293.

[10] Meng X, Liu W F, Tang L J, et al. Trot gait stability control of small quadruped robot based on MPC and ZMP methods[J]. Processes, 2023, 11(1): 252.

[11] Zhao X, Zhao Z G, Su C, et al. Stability analysis of a floating multirobot coordinated towing system based on the stability cone method[J]. Journal of Marine Science and Application, 2024, 24(2): 1-9.

[12] 嵇建成, 王玉峰, 付建军, 等. 康复助行机器人倾覆稳定性分析[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(2): 70-72.
Ji Jiancheng, Wang Yufeng, Fu Jianjun, et al. Overturning stability analysis of a rehabilitation walking-assist robot[J]. Industrial Control Computer, 2024, 37(2): 70-72.

[13] 李正正, 汪步云, 梁艺, 等. 下肢外骨骼机器人助行稳定裕度优化研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2023, 41(4): 151-156.
Li Zhengzheng, Wang Buyun, Liang Yi, et al. Optimization of walking stability margin for a lower-limb exoskeleton robot[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2023, 41(4): 151-156.

[14] Kennel-Maushart F, Coros S. Payload-aware trajectory optimisation for non-holonomic mobile multi-robot manipulation with tip-over avoidance[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(9): 7669-7676.

[15] Fan S, Wang H, Zuo C, et al. Fuzzy adaptive PID-based tracking control for autonomous underwater vehicles[J]. Actuators, 2025, 14(10): 470.

[16] Zhu C, Jin Y, Ye J, et al. Simulation and algorithm research of vacuum butterfly valve pressure control based on fuzzy PID[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, 3126(1): 012059.

[17] 严睿, 周惠兴, 张玉品, 等. 基于模糊 PID 控制的空间吊装物姿态控制[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(11): 4702-4708.
Yan Rui, Zhou Huixing, Zhang Yupin, et al. Attitude control of spatial hoisted object based on fuzzy PID control[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(11): 4702-4708.