

双轮腿机器人力位耦合建模与模型预测控制方法

孙保帅^{1,2}, 郭天帅^{1,2}

¹山东交通学院 - 轨道交通学院, 山东 济南

²济南市腿足式机器人重点实验室, 山东 济南

收稿日期: 2025年11月3日; 录用日期: 2025年12月31日; 发布日期: 2026年1月9日

摘要

双轮腿机器人融合了轮式平台的高速机动性与腿足系统的地形适应能力，在复杂环境中具备良好的运动性能。然而，其动态稳定性易受外部扰动影响，控制难度较高。为此，本文提出一种面向双轮腿机器人运动控制的自适应力位耦合模型预测控制方法。该方法基于躯干与轮腿系统的动力学建模，在躯干姿态控制中引入模型预测控制(MPC)，实现姿态与主动力的优化分配；随后通过阻抗控制策略，将最优主动力转化为关节力矩，实现轮腿系统的精确控制与动态调节。在TITA平台上的仿真实验表明，该方法实现了在复杂地形与扰动条件下系统的稳定性与鲁棒性。

关键词

双轮腿机器人，模型预测控制，运动控制，力位耦合

Force-Position Coupling Modeling and Model Predictive Control Method for Bipedal Wheel-Legged Robots

Baoshuai Sun^{1,2}, Tianshuai Guo^{1,2}

¹School of Rail Transit, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

²Jinan Key Laboratory of Legged Robots, Jinan Shandong

Received: November 3, 2025; accepted: December 31, 2025; published: January 9, 2026

Abstract

The bipedal wheel-legged robot integrates the high-speed mobility of wheeled platforms with the terrain adaptability of legged systems, exhibiting excellent motion performance in complex environments. However, its dynamic stability is highly susceptible to external disturbances, posing

文章引用: 孙保帅, 郭天帅. 双轮腿机器人力位耦合建模与模型预测控制方法[J]. 人工智能与机器人研究, 2026, 15(1): 197-209. DOI: 10.12677/airr.2026.151020

significant challenges to control. To address this issue, this paper proposes an adaptive force-position coupling model predictive control method for the motion control of bipedal wheel-legged robots. Based on the dynamic modeling of the torso and wheel-legged system, the method incorporates MPC into torso attitude control to achieve optimal distribution of attitude and active forces. Subsequently, an impedance control strategy is employed to convert the optimal active forces into joint torques, enabling precise control and dynamic adjustment of the wheel-legged system. Simulation experiments on the TITA platform demonstrate that the proposed method ensures the system's stability and robustness under complex terrain and disturbance conditions.

Keywords

Bipedal Wheel-Legged Robot, Model Predictive Control, Motion Control, Force-Position Coupling

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 移动机器人技术快速发展, 履带式、腿足式与轮式机器人在不同应用场景中展现出各自优势。腿足式机器人具备优异的地形适应能力, 适用于非结构化环境, 但在结构化场地中存在效率低、能耗高等问题; 轮式机器人则在平坦地面上表现出高效能量利用与快速移动能力。为融合两者优势, 双轮腿机器人应运而生, 兼具轮式高效性与腿足灵活性, 成为当前研究热点[1]。

典型成果包括: ETH Zurich 的 Ascento Pro 采用 LQR 控制与 DM-SLIP 模型实现 90 cm 跳跃[2]; 哈尔滨工业大学 WLR-3P 基于 TMS-DIP 模型与液压阻抗控制完成 0.2 m 越障[3]; SR600 平台通过动态高度调节方法验证了平衡与高度变化的可行性[4]; 山东大学 SKATER 系列通过轻量化结构与动力学优化实现高速转弯[5]-[7]。此外, 强化学习(RL)在关节扭矩优化中展现出显著潜力, 如腾讯 Ollie 采用 PID-RL 混合框架实现 Sim2Real 迁移, TRON1 与 TITA 平台则通过神经网络与直驱关节提升跳跃与轨迹连贯性。

尽管已有研究在运动控制与越障能力方面取得进展, 双轮腿机器人在动态环境下的姿态稳定性仍面临挑战。传统基于位置控制或静态平衡的方法难以应对高速运动中的非线性扰动, 控制精度与响应速度存在瓶颈。为此, 模型预测控制(MPC)作为一种具备前瞻性与优化能力的控制策略, 逐渐被引入轮腿机器人系统中, 用于提升姿态控制的鲁棒性与自适应性。

针对上述问题, 本文提出一种面向双轮腿机器人运动控制的自适应力位耦合模型预测控制方法。该方法构建了两层控制框架, 融合躯干姿态优化与轮腿力矩分配机制, 实现了系统在复杂地形与动态扰动下的稳定控制。本文的主要创新点包括:

构建基于轮腿系统的力位耦合动力学模型, 明确主动力与姿态之间的映射关系;

引入模型预测控制方法, 实现对躯干姿态的优化调节与控制;

设计阻抗型轮腿控制策略, 将主动力转化为关节力矩, 提升系统对扰动的响应能力。

本文结构安排如下: 第 2 节介绍实验平台; 第 3 节分析控制挑战与动力学建模; 第 4 节阐述控制框架与实现方法; 第 5 节展示实验设计与结果; 第 6 节总结工作并展望未来研究方向。

2. 实验平台: TITA 双轮腿机器人

本研究使用的实验平台为 TITA 双轮腿机器人, 其三维模型如图 1 所示。该平台由本末科技(DirectDrive Tech)研发, 具备良好的地形适应能力与动态运动性能。TITA 的每侧轮腿包含四个自由度:

髋外摆、髋俯仰、膝俯仰和轮旋转关节, 全部由一体化直驱电机驱动, 单关节峰值扭矩可达 120 Nm, 响应速度快, 适合高速移动与姿态调节任务。该平台融合了轮式高效性与腿足灵活性, 为验证双轮腿机器人在复杂地形与动态扰动条件下的运动控制方法提供了基础支撑。主要结构参数见表 1。

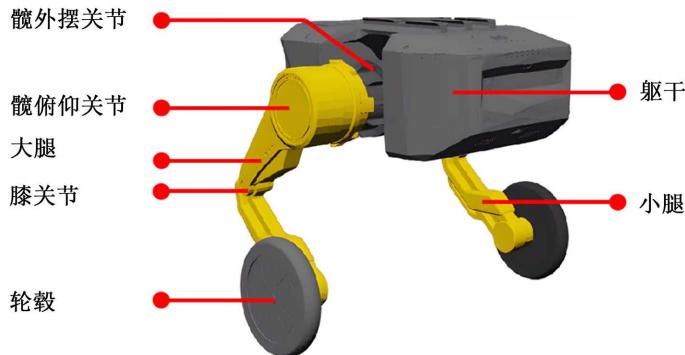


Figure 1. Three-dimensional model of a dual-wheel legged robot
图 1. 双轮腿机器人三维模型

Table 1. Key structural parameters of the robot

表 1. 机器人主要结构参数表

部件名称	参数组合(单位)	说明
躯干	500 × 310 × 300~490 mm, 13.2 kg	长 × 宽 × 高, 质量
大腿	200 mm, 3.1 kg	长度, 质量
小腿	200 mm, 0.6 kg	长度, 质量
轮子	92.7 mm, 1.54 kg	半径, 质量
髋外摆关节	[−0.78, 0.78] rad	关节运动范围
髋俯仰关节	[−3.1, 1.6] rad	关节运动范围
膝关节	[−2.7, −0.69] rad	关节运动范围

3. 控制挑战与动力学建模

在双轮腿机器人研究中, 保持动态稳定性是控制系统的根本目标。机器人躯干的姿态属于任务空间变量, 需要实时、准确地跟踪期望位姿, 以应对复杂地形与外部扰动。由于轮腿系统具有多自由度结构, 其运动过程中的力位耦合关系复杂, 控制精度与响应速度面临挑战。

在动态运动过程中, 轮腿与躯干之间存在显著的交互力, 尤其在高速转向、越障或姿态调整时, 这些交互力会影响躯干的姿态稳定性与轨迹跟踪性能。因此, 需要在控制系统中建立轮腿与躯干之间的耦合模型, 明确主动力与姿态之间的映射关系。

为实现姿态与主动力的协同控制, 本文从系统建模角度出发, 构建包含躯干与轮腿的动力学模型, 并引入状态空间表达形式, 为后续模型预测控制(MPC)设计提供基础。接下来将依次介绍机器人坐标系的设定、躯干动力学建模以及轮腿系统的动力学建模过程。

3.1. 机器人坐标系设定

为使轮腿关节施加合适的力矩以实现躯干期望运动与姿态调节, 需对轮腿系统进行动力学建模, 明确躯干广义交互力与关节力矩之间的传递关系。为精确描述机器人整体位姿与力学行为, 本文建立如图

2 所示的坐标系体系。

其中, 设世界坐标系 Σ_w 为固定参考系, 用于描述机器人在环境中的位置与姿态; 躯干坐标系 Σ_b 原点固连于躯干几何中心, x 轴指向躯干前方, z 轴指向躯干上方, 用于分析躯干的力平衡与姿态控制; 自然坐标系 Σ_n 原点与 Σ_b 重合, 坐标轴方向通过旋转变换得到, 主要用于腿部动力学计算; 此外, 为简化控制过程, 建立随动坐标系 Σ_i , 其原点位于两轮地面接触点连线的中点, x 轴指向轮前进方向并平行于水平面, z 轴指向重力反方向, y 轴由右手定则确定。该坐标系体系为后续的动力学建模与控制策略设计提供了统一的参考框架。

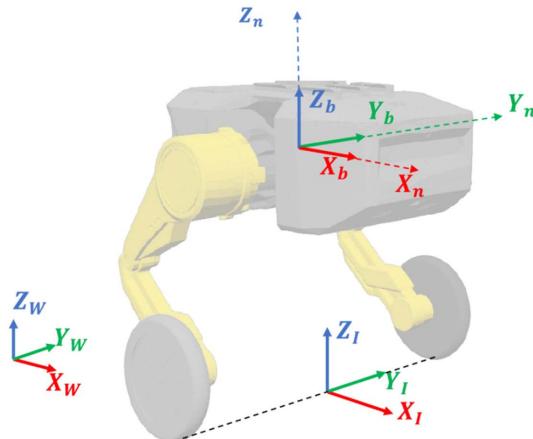


Figure 2. Robot coordinate system

图 2. 机器人坐标系

3.2. 躯干动力学建模

由于双轮腿机器人存在非完整约束, 无法主动控制 y 轴方向的力, 故在建模中忽略该方向分量, 并假设地面摩擦力充足, 可满足前向运动与航向控制对侧向支撑的需求。考虑到绕 x 轴和 z 轴的力矩主要由 y 方向力产生, 本文定义轮腿作用于躯干的主动力为 $F_{leg}^i = [f_x^i \quad \tau_y^i \quad f_z^i]^T$, 其中 $i=l,r$ 以区分左右腿。 f_x^i 为沿 x 轴(前进方向)的力, f_z^i 为沿 z 轴(垂直向上)的力, τ_y^i 为作用于矢状面、用于控制躯干俯仰的力矩, 施力点为髋关节连接处。

躯干的运动状态由广义坐标及其导数描述, 包括位置、姿态角、线速度和角速度:

$$q = [x, z, \phi, \theta, \psi]^T \quad (1)$$

$$\dot{q} = [x, z, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T \quad (2)$$

其中, x 和 z 表示躯干在 x 、 z 方向上的位移, 分别对应前进距离和站高; ϕ 、 θ 、 ψ 分别为躯干横滚角、俯仰角和偏航角。

考虑轮腿施加的主动力作用, 躯干的简化力位耦合动力学方程可表示为:

$$m\ddot{x} = f_{x,l} + f_{x,r} - m\sin(\theta) \quad (3)$$

$$m\ddot{z} = f_{z,l} + f_{z,r} - mg \quad (4)$$

$$I_y\ddot{\theta} = \tau_{y,l} + \tau_{y,r} \quad (5)$$

其中, m 为躯干质量, g 为重力加速度, I_y 表示躯干绕 y 轴的惯性张量。力位耦合体现在主动力输入与

躯干姿态变化之间的映射关系。由于部分耦合项较小, 公式(5)可近似简化为:

$$I_y \ddot{\theta} \approx \tau_{y,l} + \tau_{y,r} \quad (6)$$

3.3. 轮腿系统动力学建模

轮腿系统作为机器人的动态支撑结构, 其核心特点是具备自适应能力, 能够通过动力学响应机制应对外部干扰, 如推搡或碰撞, 并主动调整姿态以维持整体稳定性。这种能力依赖于精确的动力学建模, 从而实现力与位姿的协调控制。

双轮腿机器人的轮腿结构如图 3 所示。以逆时针为正方向, 定义轮子相对于地面的偏转角为 q_w , 小腿相对竖直方向的偏转角为 q_a , 小腿相对大腿的偏转角为 q_k , 大腿相对竖直方向的偏转角为 q_h 。

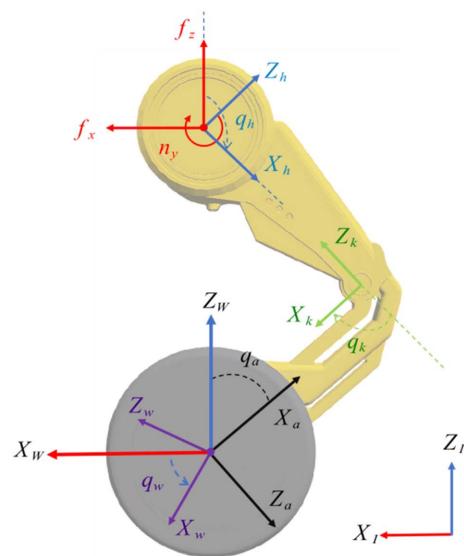


Figure 3. Wheel-leg structure of the robot
图 3. 机器人的轮腿结构

以轮子为驱动基座进行建模, 定义腿部关节的角度、角速度和驱动扭矩为:

$$\begin{aligned} q_j &= \begin{bmatrix} q_{\text{leg}} \\ q_{\text{wheel}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_h^l & q_k^l & q_h^r & q_k^r & q_w^l & q_w^r \end{bmatrix}^T \\ \dot{q}_j &= \begin{bmatrix} \dot{q}_{\text{leg}} \\ \dot{q}_{\text{wheel}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q}_h^l & \dot{q}_k^l & \dot{q}_h^r & \dot{q}_k^r & \dot{q}_w^l & \dot{q}_w^r \end{bmatrix}^T \\ \tau &= \begin{bmatrix} \tau_{\text{leg}} \\ \tau_{\text{wheel}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_h^l & \tau_k^l & \tau_h^r & \tau_k^r & \tau_w^l & \tau_w^r \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (7)$$

由于轮与腿之间存在动态耦合, 尤其在机器人运动状态变化时, 这种干扰不可忽视。尽管两个轮腿系统共同支撑躯干, 它们仍具有各自独立的动力学特性。轮关节不仅提供推进力, 也驱动整个腿部结构随动。本文采用牛顿 - 欧拉方法, 以轮为动基座进行建模。首先设定轮的初始状态, 然后依次推导踝、膝、髋关节的角速度、角加速度和线速度, 进而计算各连杆质心的运动状态。根据轮子的受力和力矩, 进一步求解各连杆的受力与力矩, 最终由髋关节的期望输出力反推各关节的驱动力矩。

由于轮子作为动基座, 其速度和加速度变化会影响整机的惯性分布, 并通过耦合关系传递至腿部,

可能引起控制误差, 影响姿态稳定性和轨迹跟踪精度。为简化建模, 本文暂不引入动基座补偿项, 而是通过优化控制策略提升系统鲁棒性。

综合上述推导, 轮腿子系统的动力学方程可整理为标准形式:

$$\tau = M(q_j, q_w) \ddot{q}_j + C(q_j, \dot{q}_j, q_w, \dot{q}_w) + G(q_j, q_w) + J_{\text{leg}}^T F_{\text{leg}} \quad (8)$$

其中, q_j 为腿部关节角度, $M(q_j)$ 为质量矩阵, $C(q_j, \dot{q}_j)$ 为科氏力与离心力项, $G(q_j)$ 为重力项, J^T 为接触雅可比矩阵, F_{leg} 轮腿主作用力。

该动力学模型为后续实现姿态控制、主力分配与模型预测控制提供了理论基础。

4. 控制框架与实现方法

基于第 3 章的动力学分析, 本文构建了一种面向双轮腿机器人运动控制的分层控制架构, 如图 4 所示。该架构包括躯干姿态控制层与轮腿力矩控制层, 形成双层闭环控制系统, 以提升机器人在动态扰动下的稳定性与鲁棒性。控制系统运行频率设为 100 Hz, 以满足实时性要求。在控制流程中, 系统接收用户输入的躯干期望姿态与速度作为指令。躯干控制层基于动力学模型, 结合当前状态信息, 求解最优轮腿主动力分布。随后, 轮腿控制层根据腿部动力学模型, 将主力转换为具体的关节力矩, 实现精确控制与姿态调节。该分层控制策略融合了姿态优化与力矩调节, 通过多层级协同作用, 为双轮腿机器人在复杂地形与动态环境下的稳定运动提供了有效支持。

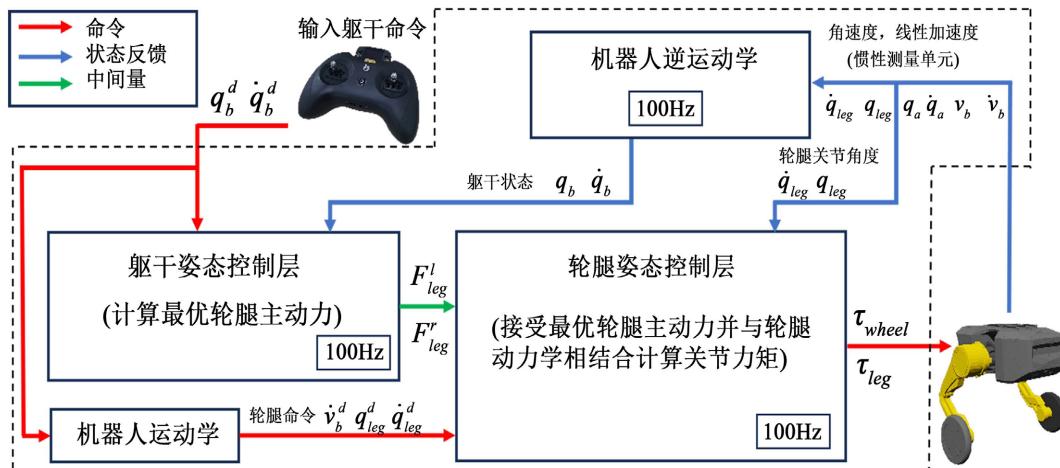


Figure 4. Control framework

图 4. 控制框架

4.1. 躯干姿态控制层

该控制层用于处理躯干与轮腿之间的动力耦合, 确保机器人在动态环境中保持姿态稳定。控制器基于躯干动力学模型, 采用模型预测控制(MPC)方法进行优化求解, 实现期望姿态的跟踪。

系统状态变量 q_b 和 u_b 包括躯干的位置与姿态、线速度和角速度;

$$q_b = [x, z, \phi, \theta, \psi]^T \quad (9)$$

$$u_b = [\dot{x}, \dot{z}, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T \quad (10)$$

因此, 系统状态为:

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_b \\ \boldsymbol{u}_b \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{10} \quad (11)$$

控制输入为左右轮腿产生的主动力, 包括前向驱动力、垂向支撑力和控制俯仰的力矩。

$$\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} F_{x,l} \\ F_{z,l} \\ \tau_{y,l} \\ F_{x,r} \\ F_{z,r} \\ \tau_{y,r} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^6 \quad (12)$$

根据第3章的动力学建模, 构建连续时间状态空间模型

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_b(t) \\ \boldsymbol{u}_b(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{5 \times 5} & I_{5 \times 5} \\ 0_{5 \times 5} & 0_{5 \times 5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_b(t) \\ \boldsymbol{u}_b(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{5 \times 6} \\ \boldsymbol{B}_d(\boldsymbol{q}_b) \end{bmatrix} \boldsymbol{u}(t) \quad (13)$$

广义坐标的变化由广义速度决定, 是速度对时间的积分结果, 广义速度的变化由轮腿施加的主动力决定, 是力作用下的加速度响应。 $\boldsymbol{B}_d(\boldsymbol{q}_b)$ 是由质量矩阵 \boldsymbol{M}_b^{-1} 、惯性张量 I^{-1} 、力作用点位置向量 \boldsymbol{r}_i 和力输入映射构成的动力学输入矩阵, 依赖于当前姿态 \boldsymbol{q}_b 。

$$\boldsymbol{B}_d(\boldsymbol{q}_b) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{M}_b^{-1} & \boldsymbol{M}_b^{-1} \\ I^{-1}((\boldsymbol{r}_1)_x + \boldsymbol{E}_N) & I^{-1}((\boldsymbol{r}_2)_x + \boldsymbol{E}_N) \end{bmatrix} \quad (14)$$

采用零阶保持法进行离散化, 得到如下离散时间系统表达:

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{A}_d \boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{B}_d \boldsymbol{u}_k \quad (15)$$

其中 \boldsymbol{A}_d 、 \boldsymbol{B}_d 分别为离散化后的系统矩阵与输入矩阵。为实现前瞻性控制, 本文设定预测步数为 $N=10$, 构建扩展状态向量与控制输入向量:

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{k+1}^T & \boldsymbol{x}_{k+2}^T & \cdots & \boldsymbol{x}_{k+N}^T \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{10N} \quad (16)$$

$$\boldsymbol{U} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{u}_k^T & \boldsymbol{u}_{k+1}^T & \cdots & \boldsymbol{u}_{k+N-1}^T \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{6N} \quad (17)$$

扩展状态空间模型可表示为:

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{A}_{\text{bar}} \boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{B}_{\text{bar}} \boldsymbol{U} \quad (18)$$

其中, $\boldsymbol{A}_{\text{bar}} \in \mathbb{R}^{10N \times 10}$ 为状态传递矩阵, 由 $\left[\boldsymbol{A}_d, \boldsymbol{A}_d^2, \dots, \boldsymbol{A}_d^N \right]^T$ 构成; $\boldsymbol{B}_{\text{bar}} \in \mathbb{R}^{10N \times 6N}$ 为控制输入传递矩阵, 包含各时刻输入对未来状态的影响。

为实现姿态跟踪与能耗优化, 构建如下二次型代价函数:

$$J = (\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}_{\text{ref}})^T \boldsymbol{Q}_{\text{bar}} (\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}_{\text{ref}}) + \boldsymbol{U}^T \boldsymbol{R}_{\text{bar}} \boldsymbol{U} \quad (19)$$

其中, $\boldsymbol{X}_{\text{ref}}$ 为期望状态轨迹; $\boldsymbol{Q}_{\text{bar}} = \text{diag}(\boldsymbol{Q}, \boldsymbol{Q}, \dots, \boldsymbol{Q}) \in \mathbb{R}^{10N \times 10N}$, $\boldsymbol{R}_{\text{bar}} = \text{diag}(\boldsymbol{R}, \boldsymbol{R}, \dots, \boldsymbol{R}) \in \mathbb{R}^{6N \times 6N}$ 。控制输入受限于轮腿驱动能力, 需满足:

$$u_{\min} \leq u_{k+1} \leq u_{\max}, \quad i = 0, \dots, N-1 \quad (20)$$

u_{\min} 为轮腿关节最驱动力矩, u_{\max} 为最大驱动力矩, 最终通过二次规划求解器 QuadProg++获得最优输入序列, 取首项 u_k^* 作为当前控制周期的执行输入。

4.2. 轮腿姿态控制层

轮腿姿态控制层负责将上一层躯干姿态控制器输出的最优主动力输入 $u_k^* \in R^6$ 转化为轮腿关节空间的驱动力矩, 实现对机器人整体姿态的精确调节与动态响应。该输入包含左右轮腿的前向驱动力、垂向支撑力以及控制俯仰的力矩, 体现了对躯干运动的主动力分配结果。

为充分利用轮腿系统的动态特性, 该控制层引入力 - 位耦合建模机制, 将主动力输入与关节空间状态之间的映射关系纳入控制计算。具体而言, 系统通过动力学模型将期望的轮腿作用力 u_k^* 映射为关节驱动力矩:

$$\tau_{ff} = \text{DynModel}^{-1}(q, \dot{q}, u_k^*) \quad (21)$$

其中, τ_{ff} 为前馈力矩, $\text{DynModel}^{-1}(\cdot)$ 表示基于动力学模型的逆解过程, q, \dot{q} 为当前腿部关节状态。该过程体现了轮腿系统中力输入与位姿响应之间的耦合关系, 是实现协调控制的关键环节。

考虑到模型不确定性、地形扰动及执行器非线性等因素, 本文进一步引入自适应阻抗控制机制, 在前馈基础上叠加反馈补偿项, 用于动态修正控制误差。反馈力矩由阻抗型 PD 控制律给出:

$$\tau_{fb} = K_p(q_{des} - q) + K_d(\dot{q}_{des} - \dot{q}) \quad (22)$$

最终, 轮腿控制器输出的关节驱动力矩为前馈与反馈的组合:

$$\tau_{leg} = \tau_{ff} + \tau_{fb} \quad (23)$$

其中, q_{des}, \dot{q}_{des} 为由逆运动学与主动力推导得到的期望关节角度与角速度, K_p, K_d 为阻抗增益矩阵。为增强系统的环境适应性, 增益参数可根据地形反馈或扰动估计进行在线调整, 构成自适应控制策略。

该控制层融合了动力学建模、力 - 位耦合机制与自适应阻抗控制策略, 具备良好的前馈精度与反馈鲁棒性, 显著提升了轮腿系统对地形变化与外部扰动的适应能力, 实现了机器人在复杂环境下的稳定运动与姿态协调。

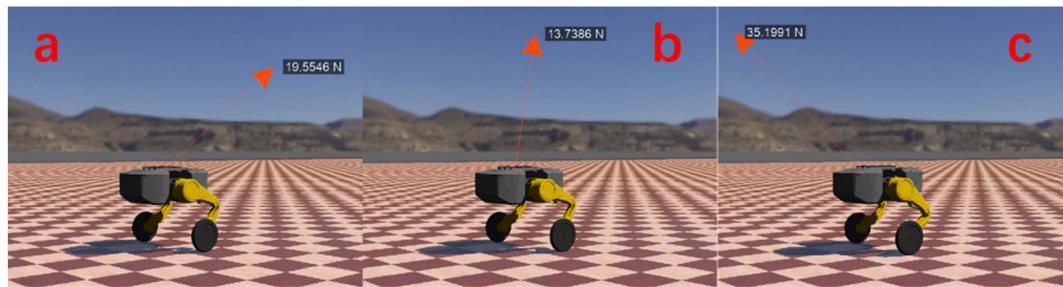
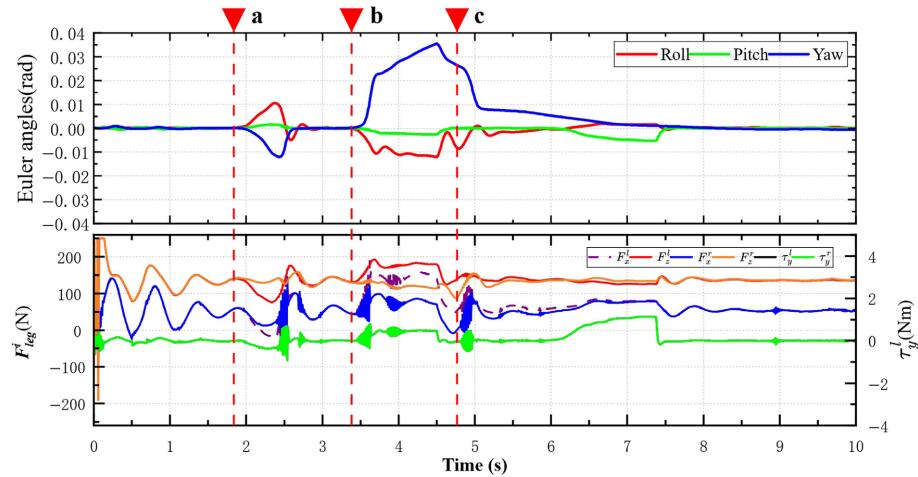
5. 实验验证

为验证所提出的轮腿自适应力 - 位耦合控制方法的有效性, 并评估双轮腿机器人的姿态稳定性与运动性能, 本文在 Webots 仿真平台上搭建了仿真环境, 并使用 C++ 编写控制程序进行实验测试。实验主要围绕静态扰动响应与动态地形适应两大核心场景展开, 所有实验均采用统一控制架构(MPC 姿态控制层 + 轮腿阻抗控制层), 启用力 - 位耦合建模与自适应反馈机制。以下结合实验场景图(图 5~12)与数据折线图, 对实验结果进行详细分析。

5.1. 静态扰动响应实验

静态扰动实验旨在测试机器人在静止状态下对外部推力的姿态恢复能力。实验初始状态为机器人静止站立于平坦地面, 躯干高度设为 0.4 m, 轮腿关节处于中性位置。仿真过程中, 通过在躯干侧面施加四种不同方向与峰值的水平推力(图 5(a)-(d)), 其中图 5(d) 为峰值达 35.1991 N 的最大扰动(持续 0.5 s), 重点验证控制器的极限抗扰性能。

从图 6 对应的姿态角与力输出折线图可见, 在外部扰动力作用下, 2 s 时开始施加扰动对应图中 a 点, 4 s 时扰动结束对应图中 c 点。姿态角响应方面, Yaw 角蓝色曲线在扰动期间逐渐增大, 于 4 s 时达到最大偏差约 0.017 rad ($\approx 1^\circ$), 未超过设计阈值 0.02 rad ($\approx 1.15^\circ$); Roll 角红色曲线与 Pitch 角绿色曲线波动极小 $\leq \pm 0.001$ rad, 几乎无明显变化, 显示姿态稳定性良好。恢复性能方面, 扰动结束后 4 s~6 s 内, 控制器通过调整轮腿支撑力如 F_x^l, F_x^r 等力输出曲线峰值达 220 N 与俯仰力矩 τ_y^l 右侧纵轴峰值达 3 N·m,

**Figure 5.** Thrust perturbation experiment**图 5.** 推力扰动实验**Figure 6.** Thrust disturbance experiment line chart**图 6.** 推力扰动实验折线图

使 Yaw 角在 2 s 内快速回落至 0 附近, 恢复至稳定状态。力与力矩输出方面, 支撑力如橙色曲线 F_z^r 与力矩在扰动期间 2 s~4 s 出现短暂波动, 其中支撑力峰值达 220 N, 俯仰力矩峰值达 3 N·m; 扰动结束后迅速收敛至平稳值支撑力 ≈ 150 N, 力矩 ≈ 0 N·m, 说明轮腿阻抗控制层能有效协调力与位置输出, 抵消外部扰动。

5.2. 动态地形适应实验

动态地形实验聚焦机器人在重力变化、支撑切换、非均匀地形下的姿态稳定性与运动连续性, 涵盖斜坡爬升、连续楼梯下降、非结构化地形穿越三类典型场景, 全面测试控制策略的动态适应性。

5.2.1. 斜坡爬升实验

斜坡爬升实验设置为机器人沿长度 2 m、坡度 30°的斜坡爬升, 考察其在重力分量变化下的姿态控制与力输出稳定性。从图 7 场景图可见, 机器人沿斜坡平稳爬升, 无倾斜或打滑现象。

对应的折线图(7~8 s)显示, 实验中机器人于 7.6 秒至 8.6 秒时间段内行驶在斜坡地形, 姿态角与力矩输出曲线清晰反映其响应特性。姿态角方面, Roll 角、Pitch 角、Yaw 角整体围绕 0 值小幅波动, 波动范围集中在 ± 0.005 弧度以内, 显示车身姿态基本稳定; 仅在 8.6 秒临近结束时 Yaw 角出现短暂下降, 最低值约 -0.008 弧度, 但未发生持续偏移, Roll 角与 Pitch 角全程波动平缓, 未出现显著倾斜或震荡, 说明车身在斜坡地形中未面临侧翻或俯仰失稳风险。力与力矩输出方面, 各轮腿支撑力在 7.6 秒至 7.7 秒初始

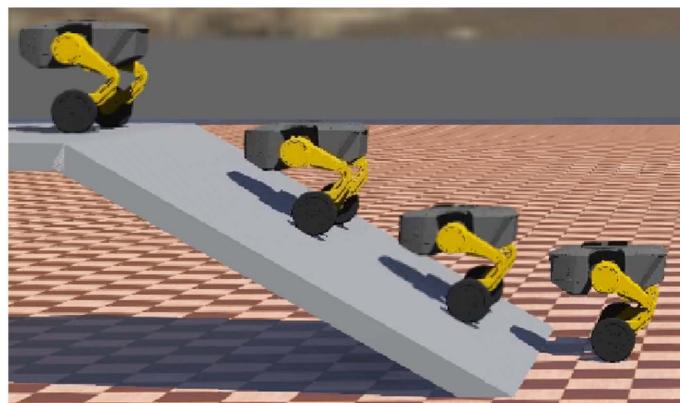


Figure 7. Slope experiment
图 7. 斜坡实验

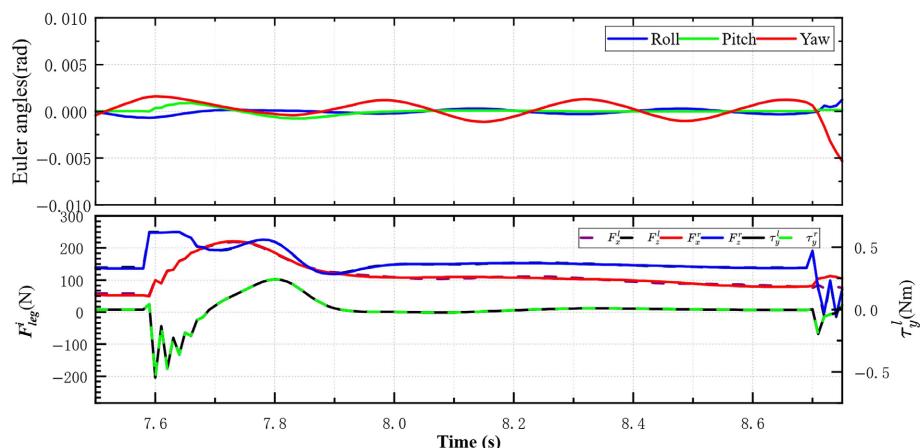


Figure 8. Slope experiment line chart
图 8. 斜坡实验折线图

接触斜坡阶段快速调整，随后趋于平稳并稳定在 100 至 200 牛顿区间，表明轮腿系统通过快速增大支撑力适应地形变化，避免打滑或倾覆；俯仰力矩整体维持在−0.5 至 0.5 Nm 的小幅范围内，仅在 7.6 秒至 7.7 秒与 8.5 秒至 8.6 秒出现短暂波动(峰值约 0.5 Nm)，说明控制器通过微调力矩平衡车身重心，抵消斜坡带来的重力分量干扰，保障行驶稳定性。实验结果表明，机器人在斜坡环境下运动时姿态角波动幅度小，轮腿支撑力与力矩输出快速响应并稳定收敛，验证了控制器在地形变化场景下的动态平衡能力和鲁棒性。

5.2.2. 连续楼梯下降实验

连续楼梯下降实验设置为机器人连续下降 10 级楼梯(每级高 0.1 m)，考察其在支撑点切换过程中的姿态连续性与力协调能力。**图 9** 场景图显示，机器人沿楼梯连续下降，无停顿或倾斜现象；

对应的折线图(8~9 s)显示，实验中机器人于 8 秒至 13 秒时间段内行驶于斜坡地形，姿态角与力矩输出曲线清晰反映了其动态响应过程。姿态角方面，Roll 角曲线、Pitch 角曲线与 Yaw 角曲线整体围绕 0 值小幅波动，Roll 角与 Pitch 角波动主要集中在±0.01 弧度以内，Yaw 角在 9 秒左右出现短暂下降至−0.02 弧度，但随后快速恢复至 0 值附近，未发生持续偏移，显示车身在斜坡运动中未出现显著侧翻或俯仰失稳，姿态保持基本稳定。力与力矩输出方面，各轮腿支撑力曲线在 8 秒至 13 秒内呈现周期性波动， F_z^r 曲线峰值达 200 牛顿以上，红色 F_x^r 曲线伴随出现±100 牛顿范围内的调整， F_z^l 曲线则维持在 100 牛顿

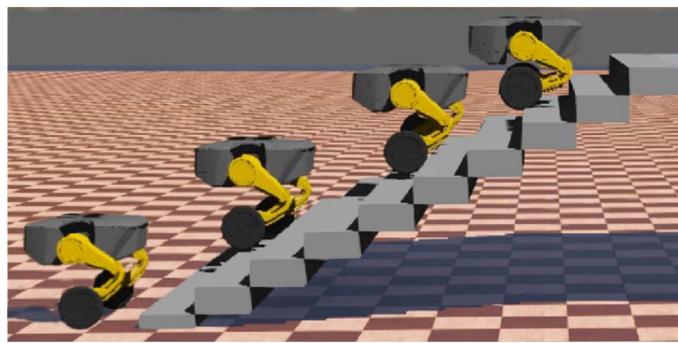
**Figure 9.** Continuous staircase experiment

图 9. 连续楼梯实验

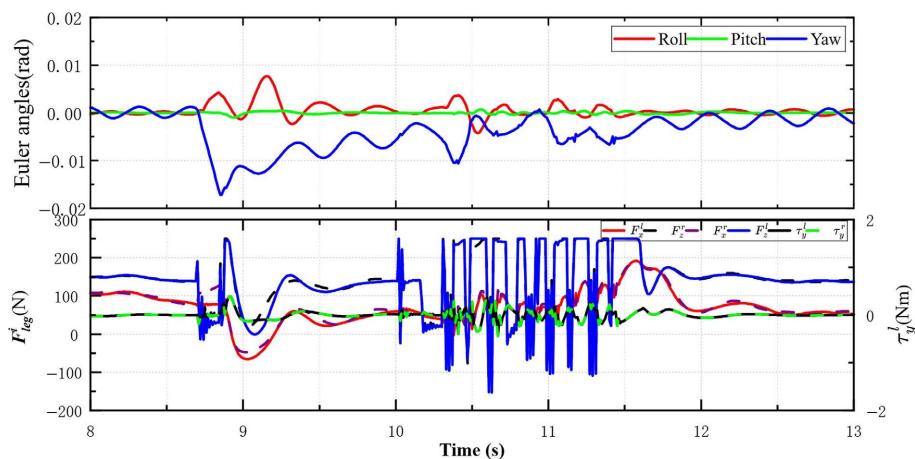
**Figure 10.** Continuous staircase data plot

图 10. 连续楼梯数据图

左右的平稳状态, 表明轮腿系统通过动态调整不同方向的支撑力, 适应斜坡地形带来的重力分量变化, 避免打滑或倾覆; 同时, 右侧纵轴的俯仰力矩在 $\pm 2 \text{ Nm}$ 之间波动, 尤其是10秒至12秒期间波动加剧, 峰值达 2 Nm , 说明控制器通过实时微调俯仰力矩, 平衡车身重心, 抵消斜坡带来的干扰, 保障行驶稳定性。实验结果表明, 机器人在斜坡环境下运动时, 姿态角波动幅度小且能快速恢复至稳定状态, 轮腿支撑力与力矩输出响应及时、调整精准, 充分验证了控制器在地形变化场景下的动态平衡能力和鲁棒性。

5.2.3. 非结构化地形穿越实验

非结构化地形穿越实验设置为机器人通过不规则障碍区域(单边桥梁、碎石地面), 测试其在非均匀支撑与地形扰动下的自适应能力。**图 11**场景图中, 红色虚线轨迹显示机器人沿预定路径顺畅穿越障碍。

对应的折线图(39~42 s)显示, 实验时间为43秒至49秒。上半部分欧拉角曲线中, Roll角、Pitch角、Yaw角整体围绕0值小幅波动, Roll角波动幅度控制在 $\pm 0.005 \text{ rad}$ 以内, Pitch角基本稳定在0附近, Yaw角虽有轻微波动但始终未超出 $\pm 0.008 \text{ rad}$ 范围, 显示机器人在实验过程中姿态保持高度稳定, 未出现显著侧翻或俯仰失稳。下半部分力输出曲线中, F_z^r 曲线在43秒初始阶段出现峰值达200 N以上, 随后快速收敛至150 N左右的稳定值; F_x^r 曲线维持在100 N上下, 波动较小; F_z^l 曲线则稳定在较低水平, 说明轮腿系统通过初始力调整快速适应工况, 之后保持稳定的支撑力输出; 右侧纵轴的俯仰力矩整体在 $\pm 0.2 \text{ Nm}$ 以内波动, 仅在45秒至47秒期间出现轻微波动, 峰值未超过0.3 Nm, 表明控制器通过微调力矩平衡车

身重心, 确保行驶稳定性。实验结果表明, 机器人在持续运动工况下姿态角波动极小, 轮腿支撑力与力矩输出响应迅速且稳定, 充分验证了控制器在长时间运行中的姿态控制精度和力控鲁棒性。

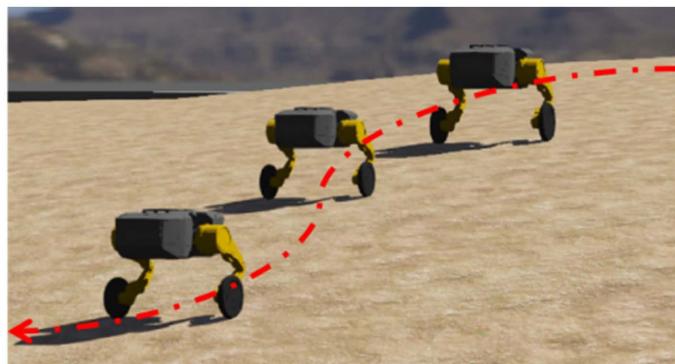


Figure 11. Unstructured terrain
图 11. 非结构化地形

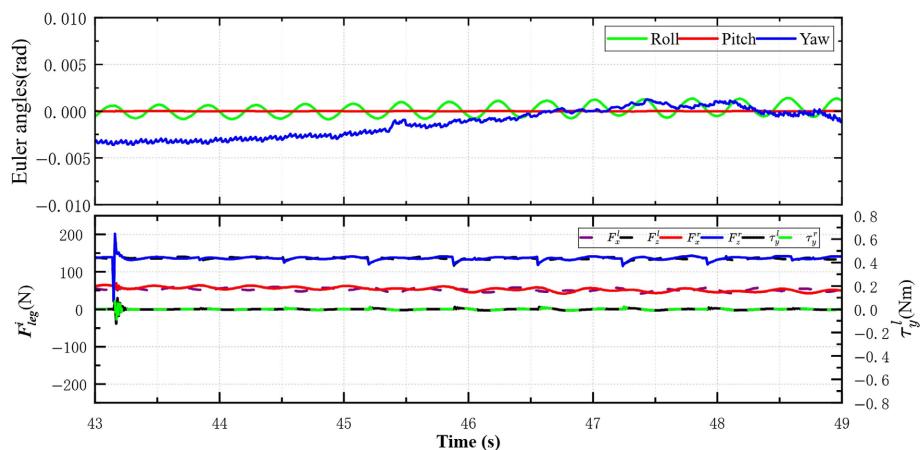


Figure 12. Unstructured terrain traversal data map
图 12. 非结构化地形穿越数据图

6. 结论

本文围绕双轮腿机器人在动态环境中的姿态稳定与运动协调问题, 提出了一种基于模型预测控制(MPC)与轮腿自适应力-位耦合机制的分层控制框架。该方法通过构建躯干动力学模型, 实现了对姿态状态的预测与优化; 同时在轮腿控制层引入力-位耦合建模与自适应阻抗反馈策略, 有效提升了系统对外部扰动与地形变化的响应能力。

在控制架构方面, 本文设计了包含运动学解析、轨迹二次规划、轮腿姿态控制等模块的分层控制系统, 实现了从高层意图输入到底层驱动执行的闭环控制流程。控制器在每个周期内通过 MPC 求解最优主动力输入, 并在轮腿控制层中结合动力学模型与反馈调节生成驱动力矩, 确保机器人在复杂环境下的稳定运行。

在仿真实验部分, 本文在 Webots 平台上搭建了双轮腿机器人模型, 并开展了静态扰动响应与动态地形适应等典型场景测试。实验结果表明, 所提出控制方法在多种扰动与地形条件下均能保持良好的姿态稳定性与运动连续性, 俯仰角波动控制在 $\pm 5^\circ$ 以内, 轮腿力矩响应平稳, 验证了控制策略的有效性与鲁棒性。

综上所述, 本文所提出的轮腿自适应力 - 位耦合控制方法具备良好的通用性与扩展性, 为多足轮式机器人在非结构化环境中的稳定运动提供了理论基础与工程参考。未来工作将进一步拓展该方法至真实硬件平台, 并结合视觉感知与环境建图, 实现更高层次的自主导航与任务执行能力。

参考文献

- [1] Liu, X., Sun, Y., Wen, S., Cao, K., Qi, Q., Zhang, X., et al. (2024) Development of Wheel-Legged Biped Robots: A Review. *Journal of Bionic Engineering*, **21**, 607-634. <https://doi.org/10.1007/s42235-023-00468-1>
- [2] Klemm, V., Morra, A., Gulich, L., Mannhart, D., Rohr, D., Kamel, M., et al. (2020) LQR-Assisted Whole-Body Control of a Wheeled Bipedal Robot with Kinematic Loops. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **5**, 3745-3752. <https://doi.org/10.1109/lra.2020.2979625>
- [3] Li, X., Zhou, H., Zhang, S., Feng, H. and Fu, Y. (2019) WLR-II, a Hose-Less Hydraulic Wheel-Legged Robot. 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Macau, 3-8 November 2019, 4339-4346. <https://doi.org/10.1109/iros40897.2019.8967935>
- [4] Liu, T., Zhang, C., Song, S. and Meng, M.Q. (2019) Dynamic Height Balance Control for Bipedal Wheeled Robot Based on ROS-Gazebo. 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Dali, 6-8 December 2019, 1875-1880. <https://doi.org/10.1109/robio49542.2019.8961739>
- [5] Wang, Y., Chen, T., Rong, X., Zhang, G., Li, Y. and Xin, Y. (2025) Design and Control of SKATER: A Wheeled-Bipedal Robot with High-Speed Turning Robustness and Terrain Adaptability. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **30**, 1310-1321. <https://doi.org/10.1109/tmech.2024.3420390>
- [6] Xin, Y., Chai, H., Li, Y., Rong, X., Li, B. and Li, Y. (2019) Speed and Acceleration Control for a Two Wheel-Leg Robot Based on Distributed Dynamic Model and Whole-Body Control. *IEEE Access*, **7**, 180630-180639. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2959333>
- [7] 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.