

分类号: TP242.6

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210120138



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目

基于滑移率预测的多地形移动

机器人运动控制研究

论 文 作 者

赵 兵

校 内 导 师

汪步云（副教授）

校 外 导 师

杨 鸥（高级工程师）

专业学位类别

机 械

研究方向（领域）

智能机器人

论文提交日期: 2024 年 6 月 1 日

分类号: TP242.6

单位代码: 10363

密 级: 公开

学号: 2210120138

基于滑移率预测的多地形移动机器人
运动控制研究

RESEARCH ON MOTION CONTROL OF MULTI-
TERRAIN MOBILE ROBOT BASED ON SLIP
RATE PREDICTION

学 生 姓 名 : 赵 兵

校 内 导 师 : 汪步云(副教授)

校 外 导 师 : 杨鸥(高级工程师)

专 业 : 机 械

研究方向(领域): 智能机器人

论文答辩日期: 2024 年 5 月 24 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：赵真

日期：2024 年 5 月 30 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

不保密 ☒。

学位论文作者签名：



日期：2024年 5 月 30 日

指导教师签名：



日期：2024年 5 月 30 日

基于滑移率预测的多地形移动机器人运动控制研究

摘 要

智能移动机器人作为智能制造的关键技术之一，其战略地位和研究意义愈加重要，其中四轮差速多地形移动机器人因其具备机动性强、地形适应性好等优点一直是移动机器人领域研究的焦点。针对多地形移动机器人在不平且附着系数不同的路面行驶时，在路面激励和自身机械结构的影响下，车轮的动载荷发生转移，车轮容易突破路面附着极限，发生过度滑移，导致移动机器人作业时的牵引性能和稳定性难以保证的问题。基于移动机器人机械机构分析并运用移动机器人动力学原理，阐明移动机器人滑移机理，建立地面-移动机器人-车轮综合动态模型，量化动态路面激励对车轮滑移率关键参数的影响，提出一种基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统，开展了仿真研究和实验研究，验证了滑移率预测控制系统抑制路面激励干扰下的车轮滑移率的有效性，论文分别从以下几个方面开展研究：

(1) 通过阐明移动机器人滑移机理，建立了路面激励下移动机器人综合动态模型。分析复杂路面下的多地形移动机器人的机械结构设计，路面激励在机械机构的传递过程，剖析移动机器人的滑移机理，提出车轮牵引力与车轮动载荷、滑移特性的耦合关系，搭建移动机器人运动控制系统，分别建立复杂路面下 1/4 车身动力学模型和整车动力学

模型，分析动态路面激励对车轮滑移率关键参数的影响，为后续滑移率预测控制算法的设计提供理论基础。

(2) 通过分析多地形移动机器人的动力学特性，提出了一种基于 NMPC(Nonlinear Model Predictive Control)算法的滑移率预测控制系统。基于移动机器人滑移机理，建立了路面最优滑移率预测模型，驱动电机控制模型，结合第 3 章建立的移动机器人综合动态模型，提出了基于 NMPC 的滑移率预测控制系统，设计多目标约束优化函数，以此求解滑移率预测控制算法，为后续的验证滑移率预测控制系统有效性的仿真研究和户外实验研究奠定了基础。

(3) 围绕多地形移动机器人滑移率预测控制系统有效性验证，开展仿真研究和户外行驶实验研究。建立 ADAMS-MATLAB/Simulink 联合仿真平台开展仿真研究，选取四种典型路面开展户外行驶实验研究，通过分析仿真和户外实验结果，得到多地形移动机器人的四轮滑移率优化量为 55.98%，56.54%，58.54%，52.05%，两侧驱动力矩值差值优化量为 10.08%，16.41%，验证了滑移率预测控制系统的有效性，抑制了路面激励干扰下的车轮滑移率，增强了车轮牵引力的转化效果，提高了移动机器人复杂路面下的运动性能。

多地形移动机器人作为研究对象，首先，基于路面激励和移动机器人机械机构的分析，阐明移动机器人的滑移机理，搭建移动机器人的运动控制系统；其次，建立移动机器人综合动态模型分析路面激励对车轮滑移率参数的影响，提出了一种基于 NMPC 算法的滑移率预

测控制系统；最后，通过开展仿真研究和实验研究验证了滑移率预测控制系统的有效性，抑制了车轮滑移率，增强了车轮牵引力的转化效果，提升了移动机器人运动性能。

关键词：多地形移动机器人，路面激励，综合动态模型，滑移率预测，NMPC 算法

RESEARCH ON MOTION CONTROL OF MULTI- TERRAIN MOBILE ROBOT BASED ON SLIP RATE PREDICTION

ABSTRACT

Intelligent mobile robot as one of the key technologies of intelligent manufacturing, its strategic position and research significance is becoming more and more important, in which the four-wheel differential multi-terrain mobile robot has been the focus of research in the field of mobile robot because of its strong maneuverability, good terrain adaptability and other advantages. When the multi-terrain mobile robot is traveling on uneven roads with different road surface adhesion coefficients, the dynamic load of the wheels will be transferred under the influence of road surface excitation and its own mechanical structure, and the wheels will easily break through the limit of road surface adhesion, and excessive slippage will occur, which leads to the problem that it is difficult to ensure the traction performance and stability of the mobile robot when it is working. By analyzing its slip mechanism, establishing a comprehensive dynamic model of ground-mobile robot-wheel, proposing a slip rate prediction control algorithm based on NMPC, and carrying out simulation and experimental research to inhibit the slip rate of the wheel under the interference of road surface excitation and to improve its traction performance and driving stability on complex road surfaces, the thesis will carry out the research in the following aspects, respectively:

- (1) A comprehensive dynamic model of mobile robot under road

surface excitation is established by elucidating the slip mechanism of mobile robot. Analyze the mechanical structure design of the multi-terrain mobile robot under complex road surface, the transmission process of road surface excitation in the mechanical mechanism, analyze the slip mechanism of the mobile robot, put forward the coupling relationship between wheel traction force, wheel dynamic load and slip characteristics, build the motion control system of the mobile robot, and establish the 1/4 body dynamics model and the whole vehicle dynamics model under the complex road surface to provide a theoretical basis for the design of the subsequent slip rate prediction control algorithm. It provides the theoretical basis for the design of the subsequent slip rate prediction control algorithm.

(2) A slip rate predictive control algorithm based on NMPC (Nonlinear Model Predictive Control) is proposed by analyzing the dynamics characteristics of multi-terrain mobile robot. Based on the slip mechanism of the mobile robot, the optimal slip rate prediction model of the road surface is established, and the drive motor control model, combined with the study of the dynamic characteristics of the mobile robot in Chapter 3, the slip rate prediction control algorithm based on NMPC is proposed, and the multi-objective constraint optimization function is designed to solve the slip rate prediction control algorithm, laying a foundation for the subsequent validation of the effectiveness of the slip rate prediction control algorithm in the simulation and outdoor experimental research. Laying the foundation for subsequent simulation and outdoor experimental research to verify the effectiveness of the slip rate prediction control algorithm

(3) Focusing on the validation of the effectiveness of the slip rate prediction control algorithm of multi-terrain mobile robot, simulation research and outdoor driving experimental research are carried out. The

ADAMS-MATLAB/Simulink joint simulation platform is established to carry out simulation research, and four typical road surfaces are selected to carry out outdoor driving experimental research. By analyzing the simulation and outdoor experimental results, the optimized four-wheel slip rate of the multi-terrain mobile robot is obtained to be 55.98%, 56.54%, 58.54%, 52.05%, and the optimized difference in the value of the driving torque on both sides is obtained to be 10.08%, 16.41%, which verifies the effectiveness of the slip rate prediction control algorithm, suppresses the wheel slip rate under the road excitation interference, enhances the conversion effect of the wheel traction force, and improves the motion performance of the mobile robot under the complex road surface.

Multi-terrain mobile robot as a research object, firstly, based on the analysis of road excitation and mobile robot mechanical mechanism, elucidating the slip mechanism of mobile robot and designing the motion control system of mobile robot; secondly, based on the comprehensive dynamic model of mobile robot with road excitation, proposing a slip rate prediction control algorithm based on NMPC; lastly, verifying the validity of slip rate prediction control by carrying out the simulation study and experimental study; lastly, verifying the validity of wheel slip rate prediction control by carrying out the simulation study and experimental study. Finally, the effectiveness of the slip rate prediction control is verified by conducting simulation and experimental studies, which suppresses the wheel slip rate, enhances the conversion effect of wheel traction, and improves the motion performance of the mobile robot.

KEY WORDS: multi-terrain mobile robot, pavement excitation, Integrated Dynamic Modeling, Slippage rate prediction, NMPC algorithm

目录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	IV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及课题来源.....	1
1.1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 多地形移动机器人研究现状.....	3
1.2.2 多地形移动机器人滑移率控制系统的研究现状.....	7
1.3 主要研究内容及章节安排.....	9
第 2 章 多地形移动机器人滑移机理分析及控制系统设计.....	11
2.1 引言.....	11
2.2 多地形移动机器人驱动滑移机理分析.....	11
2.2.1 基于路面激励的移动机器人机械结构分析.....	11
2.2.2 路面激励干扰下的移动机器人车轮滑移机理研究.....	13
2.3 多地形移动机器人控制系统搭建.....	17
2.4 本章小结.....	20
第 3 章 基于滑移机理的移动机器人综合动态模型分析.....	21
3.1 引言.....	21
3.2 基于路面激励的 1/4 车身动力学模型	21
3.2.1 路面激励动力学模型.....	21
3.2.2 1/4 车身动力学模型	23
3.2.3 车轮运动动力学模型.....	32
3.3 整车动力学模型.....	33
3.3.1 整车动力学模型分析.....	33
3.3.2 参数计算.....	35

3.4 本章小结.....	37
第 4 章 基于动态模型的 NMPC 滑移率预测控制系统研究	38
4.1 引言.....	38
4.2 基于滑移机理分析的控制模型搭建.....	38
4.2.1 路面最滑移率预测模型.....	38
4.2.2 驱动电机控制模型.....	40
4.3 基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统设计	42
4.3.1 总体控制系统搭建和滑移率控制模型建立.....	42
4.3.2 基于滑移率控制模型的目标函数设计.....	46
4.4 本章小结.....	48
第 5 章 多地形移动机器人滑移率预测控制实验研究.....	49
5.1 引言.....	49
5.2 仿真实验研究与分析.....	49
5.2.1 多地形移动机器人 ADAMS 虚拟样机搭建	49
5.2.2 ADAMS-MATLAB/Simulink 联合仿真环境搭建.....	49
5.2.3 高附着路面和低附着路面仿真实验与分析.....	51
5.3 户外多地形行驶实验研究与分析.....	56
5.3.1 户外多地形行驶实验方案设计与平台搭建.....	56
5.3.2 高附着路面实验结果分析.....	58
5.3.3 低附着路面实验结果分析.....	63
5.4 本章小结.....	67
第 6 章 总结与展望.....	68
6.1 论文总结.....	68
6.2 研究展望.....	68
参考文献.....	70
攻读硕士专业学位期间学术成果.....	75
致 谢.....	76

第 1 章 绪论

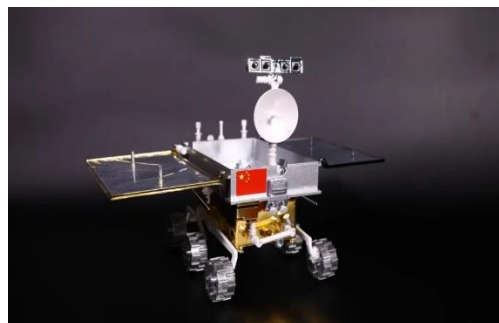
1.1 研究背景及课题来源

1.1.1 研究背景与意义

2024 年 1 月 19 日,工业和信息化部等七部门联合发布的《关于推动未来产业创新发展的实施意见》中将智能移动机器人作为全面布局未来产业的重点任务之一。移动机器人因其强大的负载能力,快速的行走速度和优异的适应性等多项优点,使其可以满足不同的作业环境需求,因此在探索与救援、物流服务与运输、社区巡逻与监控等各个工程领域显示出巨大的潜力^[1-4]。1968 年,移动机器人 Shakey 的问世,标志着移动机器人研究的开端,当时起,移动机器人的研究开始迅速发展,为了满足移动机器人在各种恶劣环境中的工作性能,多地形移动机器人技术逐渐兴起,多地形移动机器人作为一种集环境感知、自主推理、环境建模、复杂任务规划及决策为一体的通用智能移动平台,具备较好的路面通过性、环境适应性,以及极强的野外作业能力^[5-9]。



(a) 南极探测机器人



(b) “玉兔号”月球车



(c) 多地形消防机器人

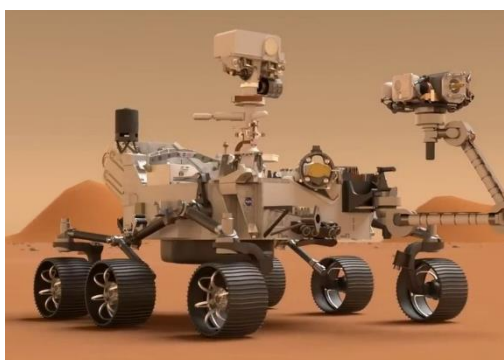


(d) 多地形移动机器人

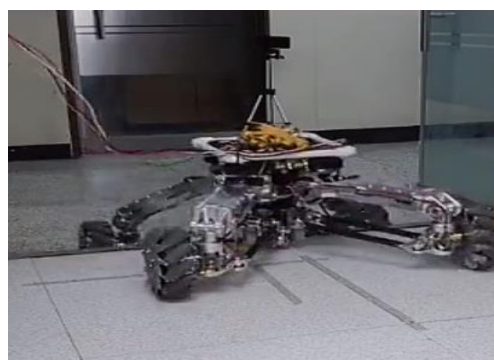
图 1-1 国内多地形移动机器人的应用

国内学者和研究机构在多地形移动机器人的研究和应用有了诸多成果，例如中国科学院自动化研究所研制出的南极探测多地形机器人(图 1-1-(a))，该探测机器人配备多地形兼容底盘，在极端环境中也能顺利完成探测任务；中国空间技术研究院主导研发的“玉兔号”月球车(图 1-1-(b))，该月球车移动系统采用六轮摇臂主动悬架，可以适应月球表面复杂的地形；图 1-1-(c)为一种采用轮履结构的多地形消防机器人，主要在复杂环境下进行灭火工作。上海一坤电气工程有限公司研制的多地形移动机器人(图 1-1-(d))，其搭载多种传感器，用途十分广泛。

国外在多地形移动机器人领域同样展现出了广泛的应用，例如美国国家航空航天局在 2020 年 7 月发射的“毅力号”火星探测车(图 1-2-(a))采用了摆臂式六轮独立悬挂系统，能够适应火星表面的崎岖地形。图(1-2-(b))为韩国 IRIM LAB 实验室发明的一种可变四轮的移动底盘，具有较强的路面通过性。(图 1-2-(c))为英伟达公司研发的移动机器人平台，提供了低成本，高效率的移动机器人平台。(图 1-2-(d))为德国 Deepfield Robotics 与奥斯纳布吕克大学合作研发的农场杂草清理机器人，可高效率清理不同路面的杂草。



(a) “毅力号”火星车



(b) 可变四轮移动底盘



(c) 英伟达全新移动机器人平台



(d) 农场杂草清理机器人

图 1-2 国外多地形移动机器人的应用

综上所述，多地形移动机器人工作环境复杂，其中，移动机器人车轮滑移率会在动态路面激励的影响下发生变化，即较容易突破其稳定区间，造成车轮过度滑移现象，降低移动机器人作业精度。传统的多地形移动机器人滑移率控制算法如表 1-1 所示。

表 1-1 滑移率控制算法对比分析表

方法	特点	控制效果
PID	无需精确模型，易实现， 控制精度较低	一般
模糊控制	理论研究较多， 难以实现算法代码化	较低
滑模控制	鲁棒性强，响应快速，抖振难以消除，难以实际应用	较好

随着多地形移动机器人面向的工况复杂程度的增加和任务完成度的提高，移动机器人在外界环境干扰下的牵引性能和行走平顺性已成为重要的评价指标，因此，抑制路面激励，车轮滑移等外部干扰，增强移动机器人的牵引性能和行驶稳定性一直是移动机器人领域的重要方向之一。

课题来源于 2022 年安徽省经信委“揭榜挂帅项目”、安徽省属公办普通本科高校领军骨干人才项目、芜湖市高层次科技人才团队“智能移动机器人运动控制及调度系统产业化项目”。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 多地形移动机器人研究现状

针对多地形移动机器人，国内外学者已进行了大量相关研究。Ma Z, Li D 等人提出了一种具有良好适地面性的单纵向臂悬架消防机器人，介绍了悬架机构的同时对悬架结构的强度进行了计算，并通过实物验证了其地面性能^[10]。张春燕、江毅文等人提出了一种可变向多地形移动全 R 副并联机器人，通过理论分析和实验验证了所设计的并联机器人对于复杂地形的适应能力^[11]。何妍颖、李晔卓等人提出了一种具有可变性车身的多模式两轮机器人，分别建立了运行学和动力学

模型，并对其多模式进行了可行性验证^[12]。孙海燕、宗成国等人提出了一种可变形履带式移动机器人机构，用以满足复杂地形的功能要求，但是未进行仿真和实验研究，缺乏有效性验证^[13]。

Aguirre-Anaya 等人研究了一种六轮驱动的多地形移动机器人，建立其动力学模型，分析了其越障能力，给出了仿真实验结果。针对复杂应用场景，配置了减振悬架机构的具体参数^[14]。Lindemann R A 等人研究了火星探测车的机动组件的设计、测试以及性能的细节，并通过试验验证了系统设计的合理性和探测车的穿越性^[15]。Bayar G 等人提出并设计了一种多地形应用可配置移动机器人 CoMoRAT，除了可以在各种地形上有效行驶外，移动机器人的本体还可以添加新的硬件，同时介绍了 CoMoRAT 的设计和构造细节，并对其进行了性能测试^[16]。Michel Lauria 等人设计了一种四轮多地形机器人 AZIMUT-2，并对其建立了基于车轮几何约束的运动学模型，研究了机动性和可操控性的程序，提出了一种基于运动学模型的控制算法^[17]。



图 1-3 Anaya 等研发的移动机器人^[14]



图 1-4 美国 NASA 火星探测车^[15]



图 1-5 Gokhan 等设计的 CoMoRAT^[16]



图 1-6 Michel 设计的 AZIMUT-2^[17]

综上，一方面，机械结构在确保多地形移动机器人适应各种地形和提升行驶平稳性方面起着至关重要的作用，另一方面，理论模型的分析精确性是实现高精

度控制的基础,尤其是多地形移动机器人需要应对更加复杂的地面条件,与平坦路面相比,崎岖路面的工作条件更能够考验移动机器人模型的准确性和控制策略的适应性,但是上述的大多数研究都未建立包含路面激励的动态模型,因此构建一个能够准确反映移动机器人在路面激励下的综合动态模型,对于研究多地形移动机器人的运动控制尤为重要。

王挺、尚哲等人为增强移动机器人在崎岖不平路面的越障能力,提出一种采用被动式越障方式的六轮摇臂移动机器人,建立相应工况的动力学模型,并通过仿真和实物实验验证了机器人的通过能力,但实物实验的工况相对单一^[18]。王红梅、张明路等人提出了一种新型的八轮腿移动机器人,基于机器人的动力学模型采用滑模控制实现轨迹跟踪,并通过仿真实验证明进行了验证,但是未进行实物实验^[19]。

Yu M 等人设计了一种主动可变几何形状的主动抑振悬架机构,针对复杂路面通过时,提高了行走平顺效果,同时给出了 1/4 小车随机路面行走的仿真过程,结果验证了主动减振悬架机构设计的有效性,有效应对路面的动态激励,增强了路面适应性,但是缺乏实物实验验证^[20]。Angeles J 等人探讨了路面动态激励的适应性及其优化效果,建立了悬架-车轮-地面动力学模型,但论文仅给出了理论探讨和仿真实验,未见样机实验验证^[21]。



图 1-7 被动摇臂式悬挂移动机器人^[22]

Foglia M 等人提出了一种采用被动摇臂式悬挂系统的机器人,具有独立控制的 4 个驱动轮以及对应的转向机构,在保证了良好的牵引性能的同时提高了不平路面的通过性^[22]。Schäfer B 等人为了保证行星探测车在各种复杂运动场

景下的路面适应性和通过性，研究了车轮-土壤接触的动力学模型和地球力学特性，并通过硬土和软土的试验验证了探测车的移动性能^[23]。Li Z 等人设计了一种基于仿生学的悬架机构，配置了基本参数，优化了负载下的减振效果，同时针对出现的“滑移”现象，提出了一种双层非线性模型预测控制方法(DNMPC)，实验结果验证了路面通过的优化效果^[24]。Iagnemma K 等人设计一种控制主动铰接悬架的漫游车，提出一种基于简单车载传感器估计车轮与地形接触角的算法，通过了仿真和实验结果，验证了该控制方法可以提高漫游车在崎岖地形上的驱动性和侧倾稳定性^[25]。

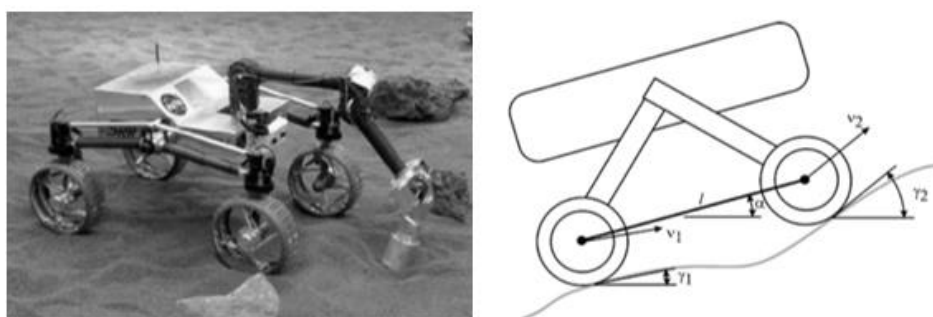


图 1-8 主动铰接悬架的漫游车^[25]

Edwin L E 等探讨了一种双状态的移动机器人，第一种状态可以像传统轮式移动机器人行驶，第二种状态则是一个球体，允许陡坡更快的下降，并与传统的摇臂悬架进行了比较，通过 Webots 高保真仿真验证了其在崎岖路面的可行性和创新性，但是缺乏实物实验对高保真仿真实验结果的验证^[26]。Tătar M O 等人提出了一种以教育和研究为目的的全向移动机器人，并提供了有关麦克纳姆全向轮，机器人机构设计的信息，建立了移动机器人的运动学和动力学模型^[27]。

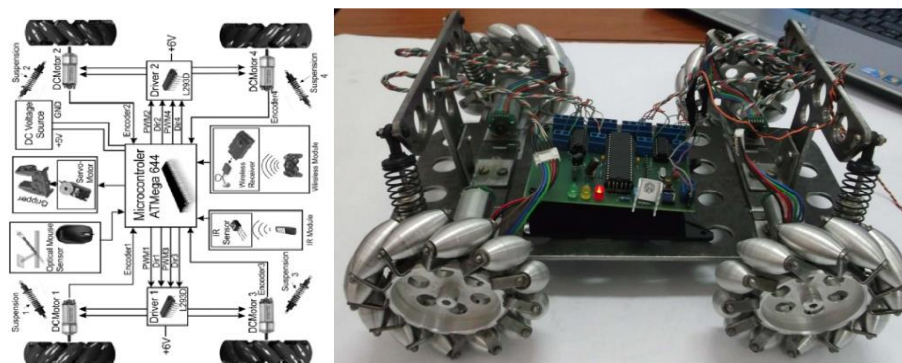


图 1-9 驱动协调移动并联机器人^[27]

为抑制控制对象的外部环境和模型不确定性的干扰，提高移动机器人的运动协调性能，在机械机构创新的同时，智能控制算法的进步同样为研究人员带来了新的思路^[28-37]。Liu Y 等人提出了一种轮式移动机器人鲁棒控制方案，设计了一种基于控制 Lyapunov 函数的新型控制器，采用基于差分平坦度的集成控制框架进行动态反馈，实现了全状态可控性，同时补偿机器人数学建模的结构不确定性以及抑制外部干扰^[38]。

熊蓉等人提出了一种基于移动机器人的运动动力学特性的轨迹跟踪实时控制方法，并通过实验验证了模型的正确性和算法的有效性^[39]。赵磊等人提出了一种适用于高速轮式移动机器人的飘逸运动控制方法，以轮胎模型为基础建立了复杂工况下移动机器人的非线性动力学模型，提出了一种基于动力学特性控制器，并通过仿真和实物实验验证了该控制器的有效性^[40]。Sun Z 等人提出了一种全方位移动农业机器人的递归型自适应模糊滑模控制策略，建立了多输入/输出的运动动力学模型，并通过实验工况验证了该控制策略的有效性^[41]。Hang D T 等人提出了一种考虑车轮滑移的四轮差速移动机器人的动态控制算法，通过搭建仿真平台验证模型和算法的实用性和有效性，但是缺乏实物实验对该仿真结果的反向验证^[42]。Li 等人提出了一种适用于轮式移动机器人的远程操作控制器，并通过添加加速度控制律来补偿由车轮滑移损失的线速度和加速度^[43]。

综上所述，国内外的众多学者关于多地形移动机器人的研究内容主要集中在移动机器人车身机械结构设计、运动控制算法等方面，但是针对四轮差速滑移转向的多地形移动机器人，较少考虑到路面激励干扰导致的移动机器人车轮过度滑移问题，因此，探究如何有效抑制车轮过度滑移，提高移动机器人复杂路面的运动性能和车身稳定性是至关重要的。

1.2.2 多地形移动机器人滑移率控制系统的研究现状

当多地形移动机器人行驶在复杂路面时，车轮在路面激励的干扰下易产生过度滑移现象，降低了移动机器人牵引力的转化效果，影响了移动机器人差速转向、原地自转等典型动作的完成效果，进一步影响了包括循迹行走、导航定位和路径跟踪等在内的控制性能指标。

国内外已有众多学者进行了滑移率控制系统的研究。叶玉博，魏超等人分析了无人平台车轮纵向滑移率问题，建立了考虑车轮转矩与车速的耦合动力学模型，在此基础上设计了鲁棒 H_∞ 最优控制器，使得滑移率得到了显著的控制^[44]。李全通，王翔宇等基于颠簸路面下轮胎纵-垂耦合状态及纵向参考车速的观测结果，提出了一种修正滑模滑移率控制算法，并通过仿真和实物硬件实验验证了优化效果^[45]。方浩、窦丽华等人了解决移动机器人的滑移补偿控制问题，基于 Luenberger 观测器设计出的自适应辨识律可以准确的建出滑移角，提高滑移控制精度^[46]。武仲斌、谢斌等人提出了一种电机驱动转矩分配策略，抑制车轮过度滑移、增强整车牵引性能，搭建仿真平台验证了分配策略的有效性，但是缺乏实车的行驶验证实验^[47]。袁野、丁亮等人针对星球车在松软地形行驶时车轮过度滑移以及下陷的问题，提出了一种视觉滑移率检测方法，并通过搭建典型工况测试台，通过对比试验验证了检测方法的有效性^[48]。

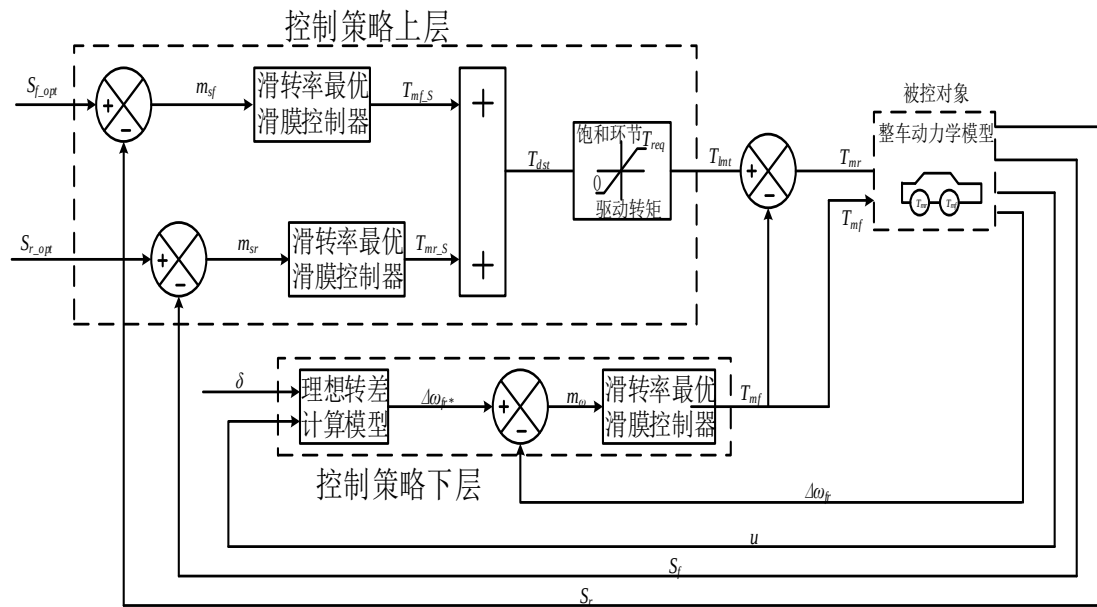


图 1-10 基于最优滑移率的转矩分配控制系统^[47]

Liao J 等人针对四轮独立驱动移动机器人转向时驱动轮滑移导致的过致动性，提出了底盘-轮的综合动力学模型，依据建立的动力学模型，提出了一种自适应鲁棒控制器，通过实物实验验证了控制器的有效性^[49]。Shi Q 等人设计了一种滑模加速度滑移调节控制方法，建立了系统动力学模型，并通过算法代码化进行了实物实验验证了控制器的控制效果^[50]。

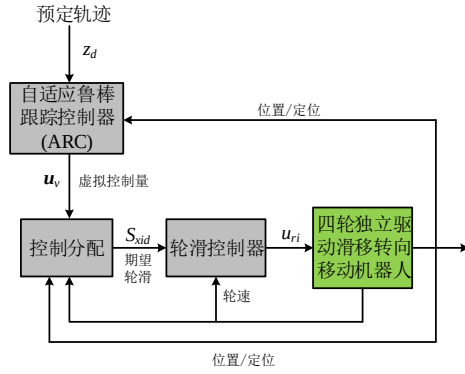


图 1-11 总体控制架构[49]

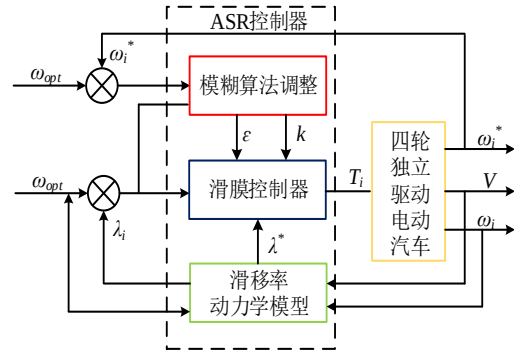


图 1-12 滑膜控制方法架构[50]

Prado A. J.等人为了减少滑移和路面条件对户外机器人导航和运动控制的干扰,提出了一种基于分布式管状非线性模型预测控制的整体控制架构(cDiNMPC),该策略的协作代理能够在子系统之间交换信息,从而在滑移的情况下均匀分配动力传动系统扭矩,并提出一种基于自适应模型的控制方案,用于在可变形地形上的轨迹跟踪^[51]。Kayacan E 等人针对自动牵引车在崎岖不平路面行驶时的轨迹跟踪问题,提出了一种分散式 NMPC 算法,通过实物实验结果验证了该算法的跟踪性能^[52]。Ke F 等人针对非完整约束差动驱动移动机器人,提出了一种受滑移扰动的鲁棒管式 MPC 控制器,结合神经网络求解控制器的最优解,并通过实物实验结果验证了控制器的有效性^[53]。Mohammadpour E.等人针对滑移转向机器人轮胎变形导致行驶转弯时的纵向滑移和横向滑移的问题,为了补偿轮胎打滑和参数不确定性的影响,设计了一种自适应扭矩控制器,并通过仿真研究验证了其有效性^[54]。

综上所述,国内外学者在多地形移动机器人的车轮滑移率控制方面搭建了不同的控制系统来抑制车轮的滑移率,提高移动机器人的牵引性能,其中,考虑到多地形移动机器人自身为一个复杂的非线性系统,作业工况大多为动态随机路面,因此对滑移率控制算法的鲁棒性有较高要求,NMPC 算法因其对于非线性系统有较强的适用性,面对复杂的外部干扰依据具有良好的预测能力,适应系统动态变化,使其可以满足多地形移动机器人高精度控制性能。

1.3 主要研究内容及章节安排

论文以在双摆臂悬架基础上装配了力矩平衡机构的四轮差速滑移转向多地

形移动机器人为研究对象，主要研究内容如下：

第 1 章 介绍了多地形移动移动机器人研究背景和意义，分析了国内外多地形移动机器人研究现状以及滑移率控制算法的常用方法，并探讨了 NMPC 算法对于移动机器人滑移率预测控制的优越性，进一步引出后续的研究内容。

第 2 章 基于多地形移动移动机器人机械机构分析，阐明动态路面激励下多地形移动机器人的滑移机理，提出了滑移率的概念，结合路面激励在移动机器人的内部的传递关系，阐释了滑移机理产生的原因，设计了移动机器人的运动控制系统，为后续户外实物实验提供了物理基础。

第 3 章 基于多地形移动移动机器人滑移机理研究，建立地面-移动机器人-车轮综合动态模型，运用滤波白噪声法，建立路面激励的动力学模型，运用达朗贝尔理论并结合移动机器人的机械机构分别建立了 1/4 车身动力学模型、车轮运动动力学模型以及整车动力学模型，揭示了移动机器人非线性系统的动力学特性规律，为后续的控制系统的的设计提供了理论基础。

第 4 章 围绕降低动态路面激励下多地形移动机器人两侧车轮力矩差，抑制车轮滑移率，提高牵引性能的问题，基于第 3 章建立的综合动态模型，提出一种基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统，构建不同路面下最佳滑移率预测模型以及驱动电机控制模型，设计多目标约束优化目标函数，求解提出的控制系统最优解，为后续仿真以及户外实验奠定了基础。

第 5 章 基于多地形移动机器人 NMPC 滑移率预测控制系统研究，开展多地形移动机器人 ADAMS-MATLAB/Simulink 联合仿真实验研究以及四种典型户外路面实物实验研究，对比分析基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统开关前后四轮滑移率以及驱动力矩优化效果，验证了提出的基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统可以有效降低动态路面激励下移动机器人两侧车轮力矩差，抑制车轮滑移，增进牵引力转化效果，提高移动机器人的运动性能。

第 6 章 对论文研究的内容进行总结，并提出后续研究的方向和需要改进的内容。

第2章 多地形移动机器人滑移机理分析及控制系统设计

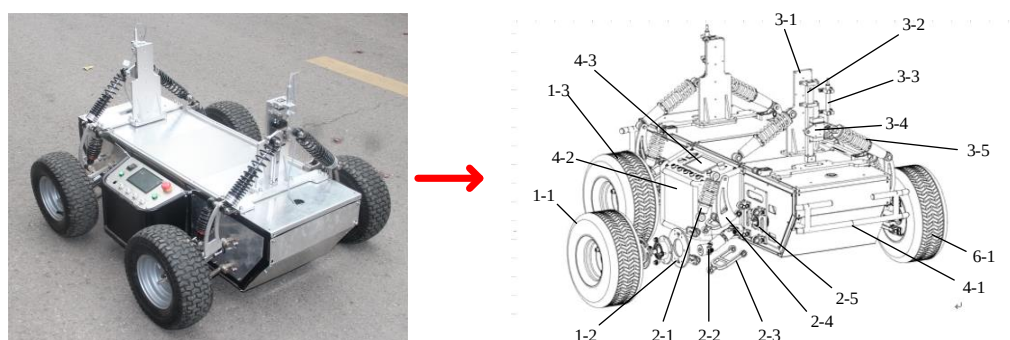
2.1 引言

本章针对动态路面激励下多地形移动机器人车轮过度滑移的问题，通过分析移动机器人机械机构并结合移动机器人动力学原理，阐释了动态路面激励下移动机器人的滑移机理，搭建移动机器人的运动控制系统，为后续研究综合动态模型和控制系统提供理论支撑，为户外行走实验研究奠定了基础。

2.2 多地形移动机器人驱动滑移机理分析

2.2.1 基于路面激励的移动机器人机械结构分析

多地形移动机器人机械结构如图 2-4 所示。



- 1-1 左前轮(车轮 4) 1-2 车轮安装板 1-3 左后轮(车轮 3) 2-1 阻尼器 1 2-2 可变轴距万向节 2-3 下摆臂 2-4 摆臂 2-5 悬架安装板 3-1 滑块安装板 3-2 滑块导轨 3-3 位移传感器 3-4 滑块 3-5 阻尼器 2 4-1 前保险杠 4-2 电池 4-3 人机交互界面 6-1 右前轮(车轮 1)

图 2-1 多地形移动机器人机械结构示意图

如图 2-1 所示的实物及机械结构示意图，悬架作为车轮与车身之间至关重要的连接部件，其主要职能是缓和路面激励对车身的影响。为了适应移动机器人在各种工况下的运动需求，同时确保系统的稳定性、操作性，采用了相较于非独立悬架系统更能有效地衰减路面激励的双摆臂独立悬架系统。为了在机械结构层面优化路面激励对移动机器人运动控制的影响，设计了力矩平衡机构，主要增加了滑轨安装板，并在其上添加了力矩平衡机构的滑轨，装配了滑块，并且配备了位移传感器来监测滑块的位移情况。为了让轮胎受到的路面激励能在力矩平衡机构

中得到柔性传递，从而减少路面激励的负面效应，在滑块与上摆臂之间加装了阻尼器，以上部件的协同配合构成了完整的多地形移动机器人。

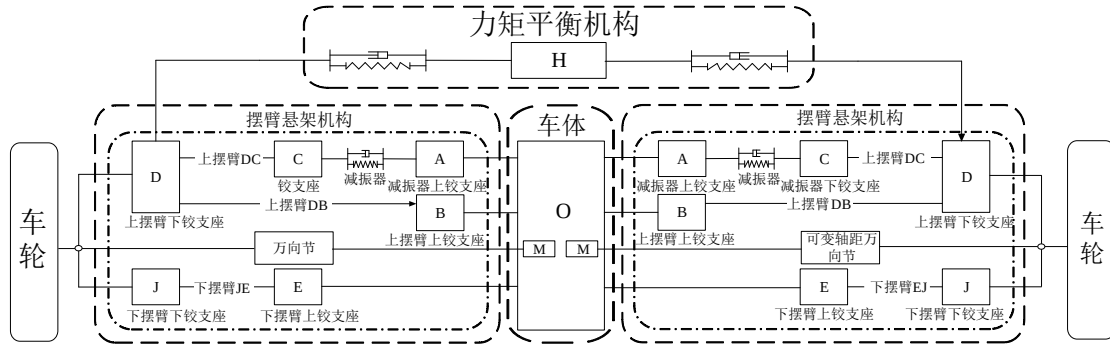


图 2-2 多地形移动机器人内部机械结构组装图

如图 2-2 所示为移动机器人内部机械结构组装图，可以看出所有部件均对称布置，整体结构紧凑，驱动电机被置于移动机器人本体内部与车轮通过可变轴距万向节连接，四个驱动电机独立驱动四个车轮。受到路面激励时，悬架机构与力矩平衡机构的响应更为迅速，使得轮胎更好地贴近地面，从而提高了稳定性。多地形移动机器人规格参数，如表 2-1 所示。

表 2-1 多地形移动机器人规格参数

设计项目	参数	备注
整车质量	100kg	含锂电池
车轮质量	5kg	活动构件质量
车轮直径	150mm	-
最大负载	100 kg	-
最高移速	3m/s	-
最小转弯半径	0 m	-
外形尺寸	945mm×845mm×405mm	长、宽、高
搭载平台尺寸	1005mm×355mm	长、宽
底盘高	122mm	-
最大爬坡角度	41°	-
防护能力	IP65	防尘、防沙
工作环境	硬质/软质路面、高/低附着路面	—

2.2.2 路面激励干扰下的移动机器人车轮滑移机理研究

多地形移动机器人在随机不平路面行驶时，车轮易出现过度滑移的现象，下面分析移动机器人的滑移机理，表 2-2 为移动机器人滑移机理参数表。

表 2-2 移动机器人滑移机理参数表

符号	名称	符号	名称
λ_i	车轮滑移率	$V_y(\text{m/s})$	车速
$\omega_i(\text{rad/min})$	轮速	$J_w(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	车轮转动惯量
$F_{yi}(\text{N})$	车轮牵引力	$F_{roll}(\text{N})$	纵向摩擦力
$F_{zi}(\text{N})$	车轮垂直载荷	$m_{us}(\text{kg})$	簧上质量
$m_{ds}(\text{kg})$	簧下质量	$M(\text{kg})$	移动机器人质量
r	车轮半径	$\mu(\lambda_i)$	路面附着系数
F_{zi}	车轮垂直载荷	μ_{max}	最优路面附着系数
λ_{opt}	车路最优滑移率	L	前后轮距
b	质心到轮子距离	ΔF_z	车轮动载荷

首先，通过滑移率的定义，分析产生滑移机理产生原因。

$$\lambda_i = \frac{\omega_i r - V_y}{\omega_i r} \quad (2-1)$$

由式(2-1)，可以看出车轮滑移率的大小主要由轮速 ω_i 和移动机器人车速 V_y 大小决定，其轮速与车轮力矩 T_i 有关， V_y 与车轮牵引力 F_{yi} 有关，关系是如下所示：

$$J_w \dot{\omega}_i = T_i - F_{yi} r \quad (2-2)$$

$$M \dot{V}_y = \sum_{i=1}^4 F_{yi} - F_{roll} \quad (2-3)$$

由式(2-2)，(2-3)可以看出，移动机器人的运动由车轮与路面激励的相互作用力 F_{yi} 产生的，主要包括摩擦力。一方面，传统的四轮差速移动机器人，由于纯粹的滚动假设，其数学模型通常忽略 F_{yi} ，然而由于多地形移动机器人特殊的机械结构，纯滚动并不成立；另一方面，对于大多数的车轮牵引力 F_{yi} 的计算大多采用轮胎模型(如 Pacejka 模型，Fiala 模型)，但是这些模型大多非常复杂，对于控制算法

的设计是不必要的，因此采用合适的摩擦模型，其中车轮摩擦力，即牵引力 F_{yi} 可计算为^[50]：

$$F_{yi} = \mu(\lambda_i) F_{zi} \quad (2-4)$$

由式(2-4)可以看出，牵引力 F_{yi} 主要由路面附着系数 $\mu(\lambda_i)$ 和车轮垂直载荷 F_{zi} 有关，不同路面的路面附着系数 $\mu(\lambda_i)$ 不同，车轮垂直载荷 F_{zi} 与路面激励和移动机器人的机械结构的息息相关，其中，路面附着系数 $\mu(\lambda_i)$ 与滑移率 λ_i 之间表达式为^[55, 56]：

$$\mu(\lambda_i) = \frac{2\mu_{\max}\lambda_i\lambda_{opt}}{\lambda_i^2 + \lambda_{opt}^2} \quad (2-5)$$

式(2-5)通过 MATLAB 进行数值拟合，得到如图 2-3 所示数值拟合图，当滑移率 λ_i 处于稳定区时，路面附着系数 $\mu(\lambda_i)$ 逐渐上升，此时车轮力矩与车轮牵引力的转化率最大化，车轮不易过度滑移；然而，一旦滑移率超过最优值 λ_{opt} ，路面附着系数 $\mu(\lambda_i)$ 逐渐下降，易发生车轮滑移。因此，通过控制算法约束车轮滑移率在稳定区内，可以确保较高的牵引力，避免移动机器人潜在的失控情况。

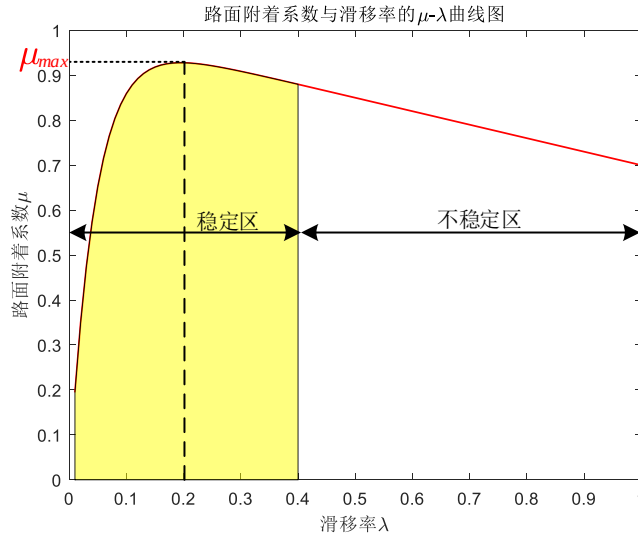


图 2-3 路面附着系数与滑移率数值拟合图

关于车轮垂直载荷 F_{zi} 等于车轮的静载荷加上动载荷，计算公式如下^[57]：

$$F_{zi} = \frac{1}{2}(m_s + m_{us})g \frac{b}{L} + \Delta F_z \quad (2-6)$$

下面结合不平路面直行和转向两种典型工况下，分析路面激励的在移动机器人内部的传递过程，研究车轮动载荷和机械结构、路面激励的三者之间的物理关系，两种工况下轮胎受力分析与运动趋势如图 2-4 所示。

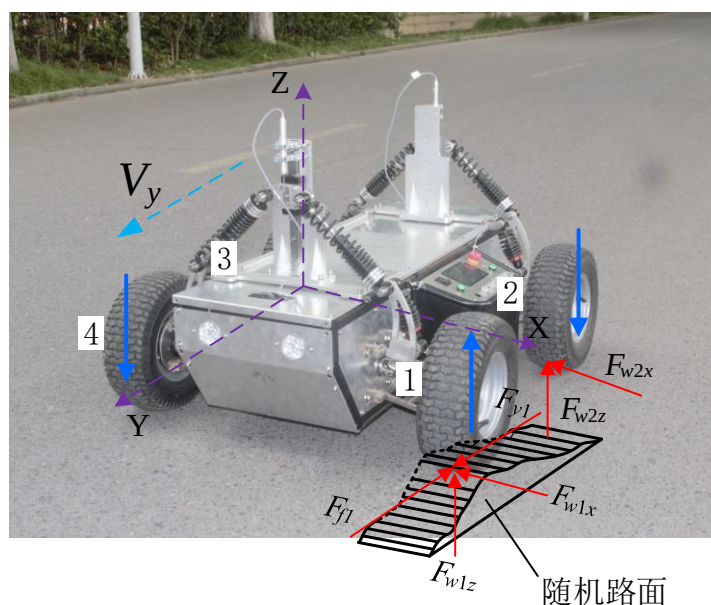


图 2-4 多地形移动机器人车轮受力分析及运动趋势示意图

多地形移动机器人行驶时，两侧车轮处于不平的路面，导致的一侧车轮受到路面激励不同于另一侧车轮，两侧车轮收到的路面激励的不同直接导致两侧车轮垂直载荷的差异化。

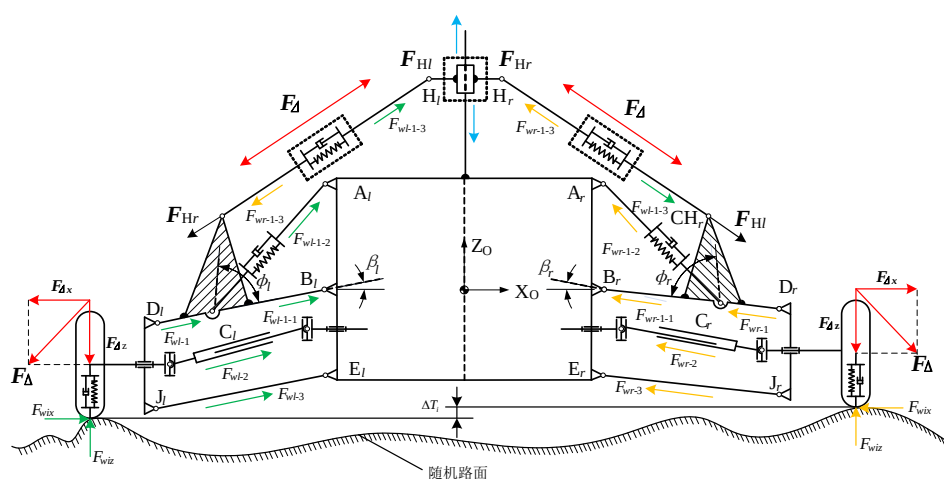


图 2-5 动态路面激励下移动机器人受力简图

表 2-3 动态路面激励传递符号名称表

符号	名称	符号	名称
D	上摆臂下铰支座 D	H	力矩平衡机构减振器上铰支座 H
C	上摆臂中铰支座 C	γ	力矩平衡机构减振器工作角度
B	上摆臂上铰支座 B	φ	铰支座 CH 工作角度
A	悬架减振器上铰支座 A	β	摆臂工作角度
E	下摆臂铰支座 E	J	下摆臂铰支座 J
CH	平衡机构减振器下铰支座 CH	-	-

将图 2-5 中动态路面激励传递路径简化为图 2-6 所示路面激励传递通道示意图：

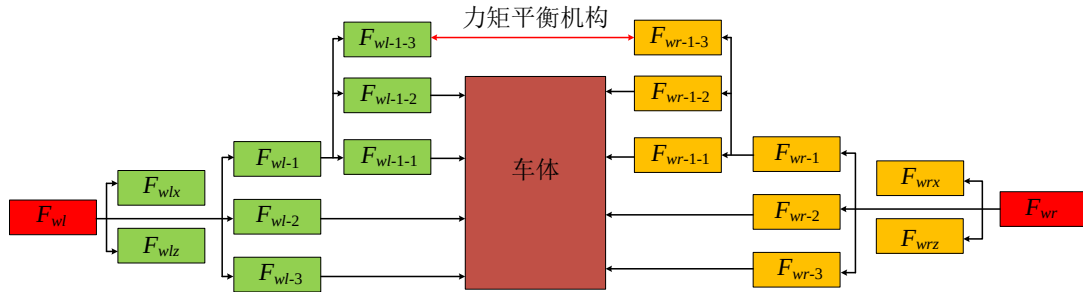


图 2-6 路面激励传递通道示意图

由于移动机器人自身结构特性，使得路面激励在移动机器人通道化，两侧车轮路面激励的不同，其中一部分路面激励通过独立悬架直接作用在车身，而力矩平衡机构的存在，使得两侧车轮的路面激励形成了“桥梁”，而在桥上来来回回行驶的“车辆”就是两侧路面激励差异化形成的包含车轮动荷载 $F_{\Delta z}$ 的力 F_{Hi} 的反作用力 F_{Δ} ， $i=(f,r)$ ，具体见式(2-7)。

$$F_{\Delta z} = F_{\Delta} \cdot \tan \beta_i^{-1} \quad (2-7)$$

联立式(2-6)，(2-7)得到多地形移动机器人在路面激励的作用下车轮垂直载荷的计算公式：

$$F_{zi} = \frac{1}{2}(m_s + m_{us})g \frac{b}{L} + F_{\Delta} \tan \beta_i \quad (2-8)$$

同轴的两侧车轮在路面激励的影响下共同作用于力矩平衡机构，此时将会出现以下三种情况：

(1) 当两侧悬架受到的激励不同时，左右两侧滑块产生的位移不同。由于两侧力矩平衡机构共联于同一滑块，滑块产生位移，因此两侧弹簧阻尼器分别被拉伸和压缩，产生的力为 F_H 。弹簧阻尼器 F_H 由悬架通道反向作用到另一侧车轮，即动载荷 $F_{\Delta z}$ 只作用一侧车轮。

(2) 当两侧悬架受到的激励相同时，力矩平衡机构不起作用。此时，左右两侧欲使滑块产生的位移相同，滑块实际产生位移与两侧欲使滑块产生的位移相同，两侧弹簧阻尼器不会被拉伸或压缩，处于不受力状态，没有动载荷沿悬架通道反向传递到车轮。

(3) 当两侧悬架受到的激励大小相同、方向相反时，滑块实际不会产生位移，即力矩平衡机构处于奇异点。此时，左右两侧滑块产生的位移大小相同、方向相反，两侧弹簧阻尼器依然会被拉伸和压缩，弹簧阻尼器受力 F_H 由悬架通道反向传递到车轮，动载荷 $F_{\Delta z}$ 作用在两侧车轮。

2.3 多地形移动机器人控制系统搭建

硬件是多地形移动机器人运行的基础，多地形移动机器人的核心功能便是在感知外部环境的前提下，实现多地形移动机器人协调运动控制，完成对智能化运输，搜索与救援等一系列自动化任务。

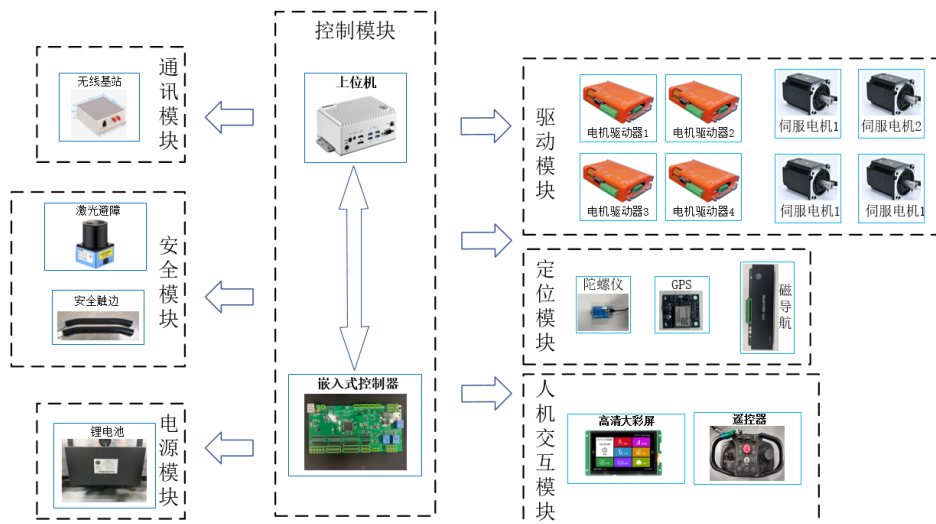


图 2-7 多地形移动机器人硬件架构图

图 2-7 展示了多地形移动机器人的综合硬件架构。这一系统主要由以下几个部分组成：控制单元、驱动模块、通信模块、安全模块、定位模块、电池管理以及人机交互界面。其中，上位机和嵌入式控制器组成的控制单元充当移动机器人控制系统的"大脑"，负责连接各类传感器和控制器，下发和接收实时数据；四台永磁伺服电机以及配套的电机驱动器组成的驱动模块则是系统的"四肢"，采用 CAN 协议与嵌入式控制器建立通讯，由嵌入式控制器下发指令到电机驱动器和电机，从而控制移动机器人的移动和各项行走任务；无线基站和上位机组成的通信模块相当于系统的"嘴巴"，它可以与上层调度系统通信，接收指令并报告自身状态；由陀螺仪、RTK 差分 GPS 组成的定位模块则是系统的"眼睛"，帮助移动机器人确定自身位置，并实时向控制单元反馈自己的实时位置和姿态，以便控制单元按照要求，调整移动机器人自身位姿和状态；激光避障雷达和安全触边组成的安全模块确保移动机器人运行过程中人员和自身安全并防止对其他设备的损害；电池管理模块保障移动机器人的持续运作和及时充电，确保系统高效运行。以上模块协同工作，共同构成了一个高效、安全且可靠的多地形移动机器人运动控制系统。

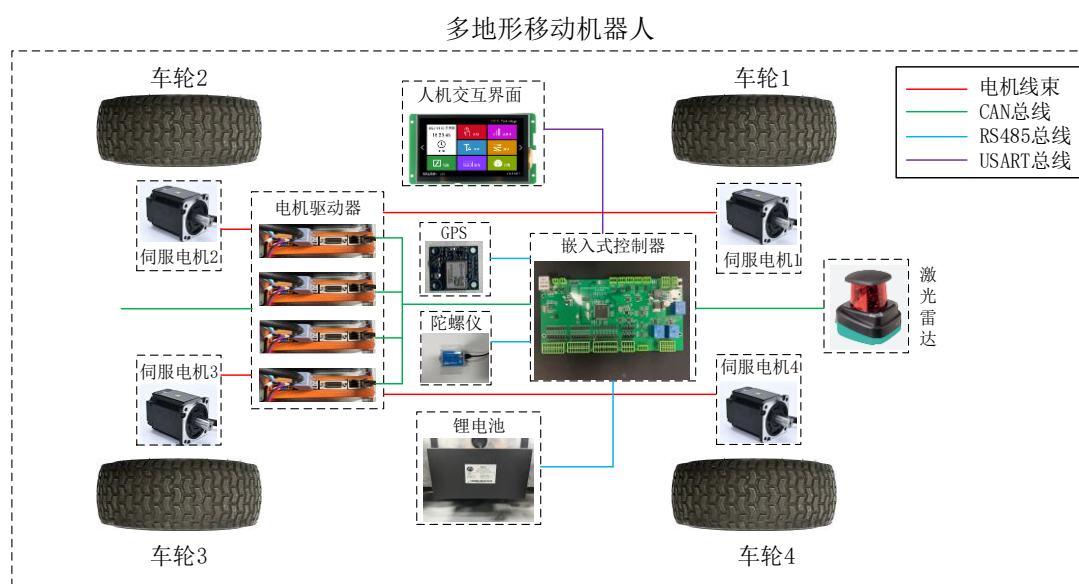


图 2-8 多地形移动机器人核心硬件连接图

如图 2-8 展示的多地形移动机器人核心硬件连接图。STM32F407 嵌入式控制器作为移动机器人的控制单元，承担着接收信号、处理数据和发布指令的任务，

将其作为参考对象，输入信号主要包括采用通过其上布置的网口，采用 MQTT 协议与上位机进行数据通信，采用 CAN 协议与移动机器人四个驱动电机的建立通信，例如设置电机位置控制模式和速度控制模式、陀螺仪传感器主要采集移动机器人的质心加速度，主要包括 X，Y，Z 三轴加速度以及对应的角加速度。输出信号方面，嵌入式控制器提供了人机交互界面输出、由控制器给定永磁伺服电机的转速输出信号、嵌入式控制器将采集的传感器及外设数据上传给上位机等输出信号、人机交互界面主要负责监控系统状态、参数写入以及传感器的开关等相关功能。

表 2-4 多地形移动机器人主要硬件参数表

硬件名称	内部项目	参数
	通讯协议	TTL、RS485、CAN
	工作电压	DC5-12V
	尺寸	250mm*140mm*8mm
	输出 IO 口	14 个 24VDC
	输入 IO 口	10 个 24VDC
陀螺仪	型号	Agilelight-B
	供电电压	DC 5V
	尺寸	Φ140mm*5mm(圆形)
	动态精度	0.3°
	静态精度	0.05°
	通讯协议	RS485
	工作温度	-40°-85°
GPS 定位传感器	型号	WTRTK-4G
	定向精度(RMS)	0.1°/1m 基线
	时间精度(RMS)	20ns
	速度精度(RMS)	0.03m/s
	差分数据	RTCM V3.X

驱动电机	型号	80M-02430C5-C/IPM
	额定功率	0.75Kw
	额定电压	DC48V
	额定转速	3000rpm
	最高转速	3200rpm
	工作温度	-20°-40°
激光雷达	型号	R2000
	通信协议	TCP/IP
	测量范围	0.2-60m
	扫描角度	360°
	分辨率	1mm
安全触边	电源电压	DC 24V
	通讯方式	I/O 输出信号
锂电池	型号	IYP-48V15AH-A3
	标称电压	48V
	额定容量	15Ah
	通讯协议	RS485、CAN
	尺寸	300mm*180mm*140mm
	重量	19.5kg

2.4 本章小结

本章基于多地形移动机器人机械结构分析与移动机器人动力学等原理，分析移动机器人滑移机理，建立了路面激励、车轮载荷和车轮滑移率的耦合关系，为后续综合动态模型的建立指明了方向，搭建了多地形移动机器人的运动控制系统，为后续的户外实物实验提供了物理基础。

第3章 基于滑移机理的移动机器人综合动态模型分析

3.1 引言

本章基于 2.2 节多地形移动机器人滑移机理分析,在此基础上建立路面-移动机器人-车轮综合动态模型,包括路面激励动力学模型、1/4 车身动力学模型,车轮运动动力学模型,量化了路面激励对移动机器人车轮滑移率关键参数的影响,为第 4 章滑移率预测控制系统的提出奠定基础。

3.2 基于路面激励的 1/4 车身动力学模型

3.2.1 路面激励动力学模型

多地形移动机器人作业环境较为复杂,主要工况分为直行和差速转向,为了建立地面-移动机器人-车轮综合动力学模型,需要考虑多地形移动机器人在不同路面受到的动态路面激励的影响,由 2.2.2 得知,移动机器人的车轮主要受到路面的侧向激励以及垂向激励,因此,四轮差速移动机器人需要同时考虑来自路面的侧向以及垂向路面激励^[58-60]。

表 3-1 路面激励动力学模型参数表

符号	名称	符号	名称
F_{wix}	侧向路面激励	F_{Di}	上摆臂铰支座 D 受力
F_{wiz}	垂向路面激励	F_{ji}	下摆臂铰支座 J 受力
n	频率	n_0	参考频率
ω	频率指数	Gq/k_q	路面不平度系数
$\omega(t)$	高斯白噪声	f_0	截止频率

随机路面激励 F_{wi} 沿 X , Y , Z 分解,表达式如下:

$$F_{wi} = \begin{bmatrix} F_{wix} & F_{wiy} & F_{wiz} \end{bmatrix}^T \quad (3-1)$$

由于移动机器人悬架结构沿 Y 轴方向没有自由度,即 $F_{wi} = [F_{wix} \quad F_{wiz}]$,将 F_{wiz} 分为固有支持力和因地形因素产生的冲击载荷,具体表达为:

$$F_{wiz} = -k_1 z_i - k_1 z_0 \quad (3-2)$$

(1) 硬质路面激励

基于硬质路面功率谱密度，描述路面不平度的统计特性，表达式如下所示：

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-\omega} \quad (3-3)$$

基于滤波白噪声法，得到硬质路面垂向位移输入为：

$$\dot{z} = -2\pi f_0 z_0 + 2\pi \sqrt{G_0(n_0) V_y} \omega(t) \quad (3-4)$$

(硬质)路面不平度等级划分如表 3-2 所示：

表 3-2 (硬质)路面不平度等级划分表

路面种类	G_0/m^3	路面等级	G_0/m^3
A	16×10^{-6}	E	4096×10^{-6}
B	64×10^{-6}	F	16384×10^{-6}
C	256×10^{-6}	G	65536×10^{-6}
D	1024×10^{-6}	H	262144×10^{-6}

(2) 软质路面谱激励

移动机器人在软质路面行驶时，路面会发生变形，具体可表示为：

$$G_q(n) = k_q n^{-\omega} \quad (3-5)$$

基于滤波白噪声法，得到软质路面垂向位移输入为：

$$\dot{z} = -2\pi f_0 z_0 + 2\pi \sqrt{G_0(n_0) V_y} \omega(t) \quad (3-6)$$

(软质)路面不平度等级划分如表 3-3 所示：

表 3-3 (软质)路面不平度等级划分表

路面等级	k_q/m^3
农耕地面	1×10^2
垄沟地面	$1 \times 10^{1.37}$
田间路面	$1 \times 10^{-0.46}$
乡村路面	$1 \times 10^{-0.48}$

定义 F_{wix} 为路面对车轮的侧向激励，可分解表达为路面附着力和冲击载荷的效果叠加 $F_{\delta x}$ 。

$$F_{wix} = -k_1 z_i \mu + k_1 z_0 \mu + F_{\delta x} \quad (3-7)$$

路面激励 F_{wi} 表达如下^[61-63]:

$$F_{wi} = \begin{bmatrix} F_{wix} \\ F_{wiy} \\ F_{wiz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_1 z_i \mu \operatorname{sgn}(v_x) - k_1 z_0 \mu \operatorname{sgn}(v_y) \\ -k_1 z_i f - k_1 z_0 f \\ -k_1 z_i + k_1 z_0 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

创建 MATLAB 脚本文件, 编写滤波白噪声随机路面激励.m 文件, 运行得到多地形移动机器人车轮所受到的随机路面激励时域响应曲线如图 3-1 所示:

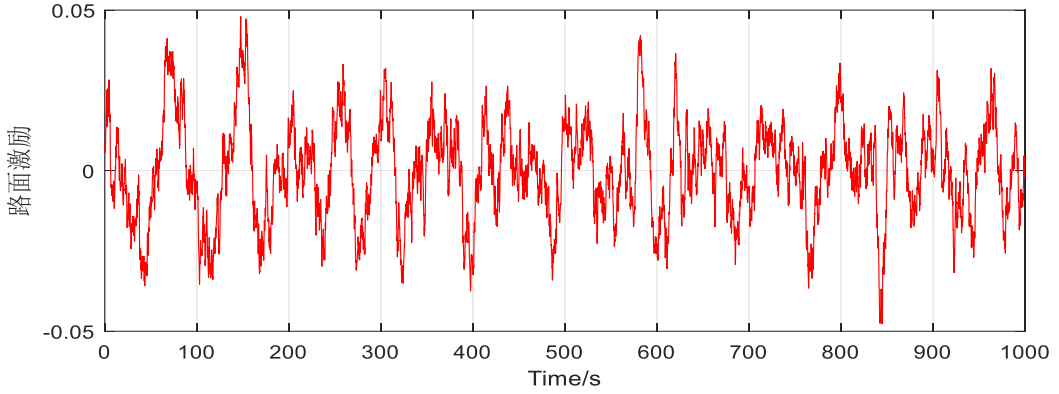


图 3-1 随机路面激励时域响应图

3.2.2 1/4 车身体力学模型

针对在路面激励下移动机器人悬架出现的跳动情况, 如图 3-2 所示, 做具体探讨。

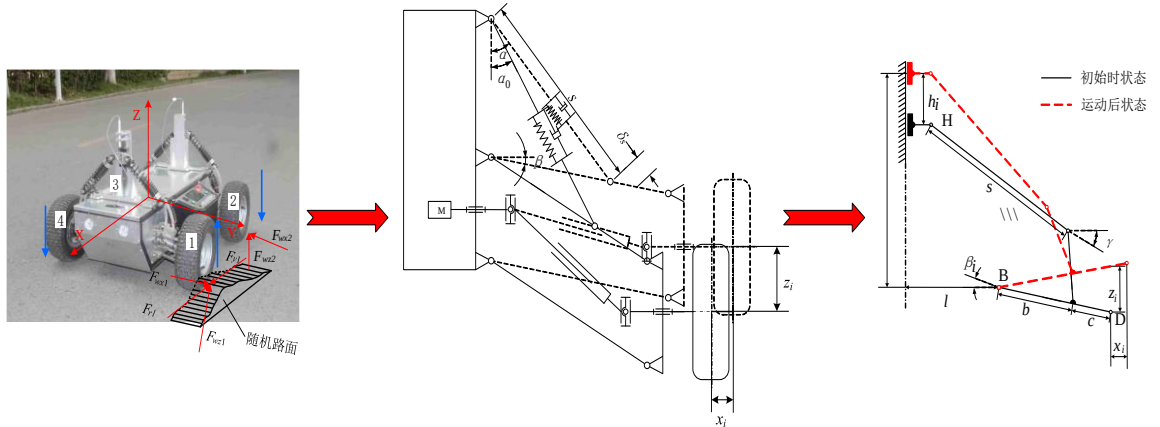


图 3-2 多地形移动机器人悬架运动示意图

当移动机器人的悬架行程在路面激励影响下发生变化时, 减振器长度、摆臂角度以及车轮侧向位移等参数也会相应地发生变化^[62, 64]。因此, 建立移动机器人

悬架运动函数，侧向位移为 x_i ，减振器长度变化量用 s_i 表示， s_i 为车轮垂向位移 z_i 的函数， s_0 为减振器初始安装长度。

$$s_i = \sqrt{s_0^2 - \frac{2abz_i}{d}} - s_0 \quad (3-9)$$

减振器安装角度 α_i 和摆臂角度 β_i 的大小与车轮垂向位移 z_i 的变化密切相关，具体表达如式(3-10),(3-11)所示：

$$\cos^{-1} \alpha_i = \frac{s_0^2 + a_2 - b_2 + \frac{2abz_i}{d}}{2a\sqrt{s_0^2 + \frac{2abz_i}{d}}} \quad (3-10)$$

$$\cos^{-1} \beta_i = \frac{s_0^2 - a_2 - b_2}{2ab} + \frac{z_i}{d} \quad (3-11)$$

车轮侧向位移 x_i 与垂向位移 z_i 相关，具体表达式为：

$$x_i = z_i \tan\left(\frac{\beta_i + \beta_0}{2}\right) \quad (3-12)$$

其中 β_0 为摆臂初始角度，由于摆臂角 β_i 与车轮跳动垂向位移量 z_i 关系表达式较为复杂，悬架在跳动时 β_i 变化量较小，将其简化为：

$$x_i = z_i \tan \beta_0 \quad (3-13)$$

基于达朗贝尔原理，建立移动机器人悬架动力学模型，考虑来自路面激励 F_{wi} 和自身的重力 m_1g ，考虑约束反力，车轮产生的加速度为 $\ddot{z}_i$ 和 $\ddot{x}_i$ 。

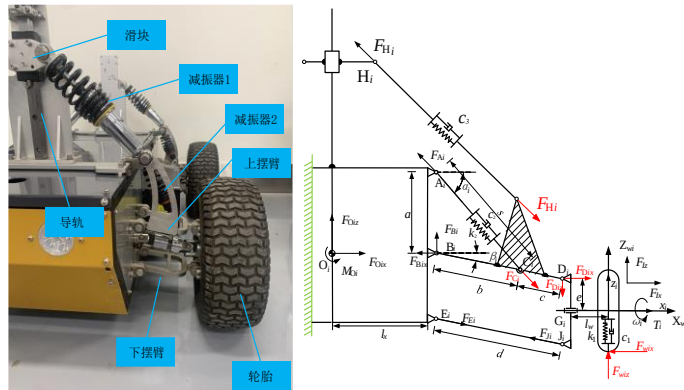


图 3-3 1/4 悬架受力分析图

如图 3-3 所示，路面激励和自身的重力 m_1g 作用于移动机器人车轮，上摆臂铰支座 B_i, D_i 的受力分别为 F_{B_i} 和 F_{D_i} ，下摆臂 EJ 两端受力分别为 F_{E_i} 和 F_{J_i} ，减振器

A_iC_i 两端受力分别为 F_{Ai} 和 F_{Ci} ，滑块弹簧 CH 两端受力为 F_{Hi} 。车身虚拟固定支座受力为 $[F_{Oix} F_{Oiz} M_{Oi}]^T$ 。上图中出现的受力参数含义如表 3-4 所示^[65]。

表 3-4 1/4 悬架受力分析及参数表

符号	名称	符号	名称
F_{Ai}	铰支座 A 受力	F_{Bi}	铰支座 B 受力
F_{Ci}	铰支座 C 受力	F_{Di}	铰支座 D 受力
F_{Ei}	铰支座 E 受力	F_{Ji}	铰支座 J 受力
F_{Oix}	横向受力	F_{Oiz}	垂向受力
M_{Oi}	力矩	F_{wix}	路面侧向激励
F_{wiz}	路面垂向激励	ω	车轮转速
m	车轮质量	T_i	车轮驱动转矩
k_1	车轮弹性刚度	c_1	车轮阻尼系数
k_2	减振器刚度	c_2	减振器阻尼
α_i	减振器安装角度	β_i	摆臂角
a	A、B 间距	b	B、C 间距
c	C、D 间距	d	摆臂长度
e	D、G 间距	l_w	车轮与悬架间距
r	车轮半径	s_i	减振器长度
l_x	1/2 车架长度	l_y	1/2 轴距
x_i	轮胎侧向位移	z_{wi}	车轮垂向位移

如下图 3-4 所示，为车轮部件受力分析示意图：

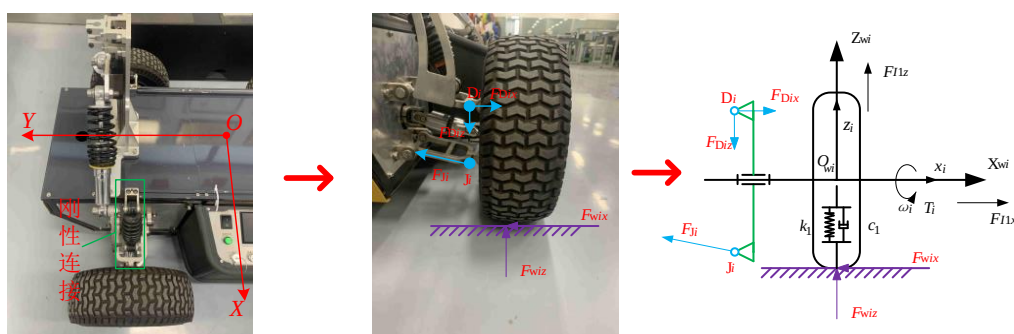


图 3-4 车轮部件受力分析示意图

车轮和悬架在 Y 轴方向无自由度，因此对车轮部件进行受力分析时，忽略来自纵向的路面激励，车轮受到的路面激励 F_{wi} 通过车轮传递到上摆臂和下摆臂与车轮部件铰支座 D 和 J 处。

表 3-5 车轮受力分析符号表

符号	名称	符号	名称
F_{wix}	侧向路面激励	F_{Di}	上摆臂铰支座 D 受力
F_{wiz}	垂向路面激励	F_{ji}	下摆臂铰支座 J 受力
F_{li}	车轮惯性力	T_i	车轮转矩
k_1	车轮弹性刚度	c_1	车轮阻尼系数
x_i	车轮侧向位移	z_{wi}	车轮垂向位移

基于达朗贝尔原理，建立车轮动力学模型：

侧向力平衡：

$$F_{Dix} - F_{ji} \cos \beta_i - F_{wix} + F_{lix} = 0 \quad (3-14)$$

垂向力平衡：

$$-F_{Diz} + F_{ji} \sin \beta_i + F_{wiz} - m_1 g + F_{liz} = 0 \quad (3-15)$$

力矩平衡：

$$-2eF_{ji} \cos \beta_i - (e+r)F_{wix} + l_w(F_{wiz} - m_1 g) = 0 \quad (3-16)$$

联立式(3-14)，(3-15)，(3-16)，得：

$$\begin{cases} F_{Dix} - F_{ji} \cos \beta_i - F_{wix} + F_{lix} = 0 \\ -F_{Diz} + F_{ji} \sin \beta_i + F_{wiz} - m_1 g + F_{liz} = 0 \\ -2eF_{ji} \cos \beta_i - (e+r)F_{wix} + l_w(F_{wiz} - m_1 g) = 0 \end{cases} \quad (3-17)$$

将式(3-17)变换为矩阵表达，得：

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -\cos \beta_i \\ 0 & -1 & \sin \beta_i \\ 0 & 0 & -2e \sin \beta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Dix} \\ F_{Diz} \\ F_{ji} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ e+r & -l_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{wix} \\ F_{wiz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Ix} \\ F_{Iz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ m_1 g \\ m_1 g l_w \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

建立多地形移动机器人悬架机构中的上摆臂受力分析，具体受力关系如图 3-5 所示。

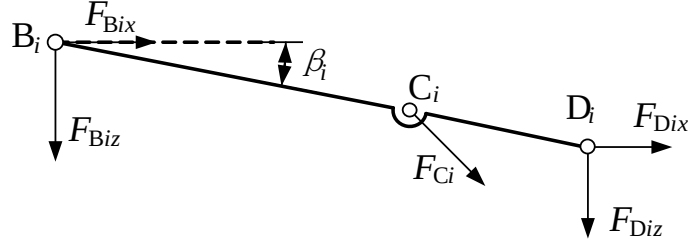


图 3-5 上摆臂受力分析图

表 3-6 上摆臂受力分析参数表

符号	名称	符号	名称
F_{Bix}	横向路面激励	F_{Dix}	上摆臂铰支座 D 受力
F_{Biz}	垂向路面激励	F_{Diz}	下摆臂铰支座 J 受力
F_{Ci}	车轮惯性力	β_i	车轮转矩
k_1	车轮弹性刚度	c_1	车轮阻尼系数
x_i	车轮侧向位移	z_{wi}	车轮垂向位移

根据达朗贝尔原理，列写上摆臂受力方程：

侧向力平衡：

$$F_{Bix} + F_{Ci} \cos \alpha_i - F_{Dix} = 0 \quad (3-19)$$

垂向力平衡：

$$-F_{Biz} - F_{Ci} \sin \alpha_i + F_{Diz} = 0 \quad (3-20)$$

力矩平衡：

$$-cF_{Dix} \sin \beta_i + cF_{Diz} \cos \beta_i - bF_{Bix} \sin \beta_i + bF_{Biz} \cos \beta_i = 0 \quad (3-21)$$

联立式(3-19)，(3-20)，(3-21)，得：

$$\begin{cases} F_{Bix} + F_{Ci} \cos \alpha_i - F_{Dix} = 0 \\ -F_{Biz} - F_{Ci} \sin \alpha_i + F_{Diz} = 0 \\ -cF_{Dix} \sin \beta_i + cF_{Diz} \cos \beta_i - bF_{Bix} \sin \beta_i + bF_{Biz} \cos \beta_i = 0 \end{cases} \quad (3-22)$$

将式(3-22)变换为矩阵表达，得：

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cos \alpha_i \\ 0 & -1 & -\sin \alpha_i \\ -b \sin \beta_i & b \cos \beta_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Bix} \\ F_{Biz} \\ F_{Ci} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ c \sin \beta_i & -c \sin \beta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Dix} \\ F_{Diz} \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

联合式(3-18), (3-23), 消去中间过程变量 F_{Ji} , F_{Dix} , F_{Diz} , F_{Bix} , F_{Biz} , 得到车轮动力学垂向位移描述, 即

$$\frac{m_1 d}{\cos \beta_i} \ddot{z} + b \sin(\alpha_i - \cos \beta_i) F_C + d \sin \beta_i F_{wix} - d \cos \beta_i F_{wiz} + d \cos \beta_i m_1 g = 0 \quad (3-24)$$

其中, δ_{si} 为减振器在作用力 F_{Ci} 下的伸缩量, 减振器作的理想动力学模型表达如下:

$$F_{Ai} = F_{Ci} = k_2 \delta_{si} + c_2 \dot{\delta}_{si} \quad (3-25)$$

其中 δ_{si} 表达式较为复杂, 观察在悬架允许跳动范围内随车轮垂向位移 z_i 的变化曲线接近一次函数, 采用曲线拟合方式将其简化为:

$$\delta_{si} = C_1 z_i \quad (3-26)$$

$$\dot{\delta}_{si} = C_1 \dot{z}_i \quad (3-27)$$

悬架摆臂角 β_i 和减振器工作角 α_i 关于车轮垂向位移 z_i 的函数, 表达式较为复杂, 观察在悬架允许跳动范围内 α_i 和 β_i 变化幅度较小, 因此为方便计算, 将其视为定值进行分析, 至此得到悬架动力学方程为:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} bC_1 k_2 \sin(\alpha_i - \beta_i) & bC_1 c_2 \sin(\alpha_i - \beta_i) & m_1 d \csc \beta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -d \sin \beta_i & d \cos \beta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{wix} \\ F_{wiz} \end{bmatrix} - d \cos \beta_i m_1 g \end{aligned} \quad (3-28)$$

根据达朗贝尔原理, 列写不考虑力矩平衡机构 1/4 车身受力方程:

横向力平衡:

$$F_{Oix} = -F_{Bix} + F_{Ai} \sin \alpha_i + F_{Ei} \cos \beta_i \quad (3-29)$$

垂向力平衡:

$$F_{Oiz} = F_{Biz} + F_{Ai} \cos \alpha_i - F_{Ei} \sin \beta_i \quad (3-30)$$

力矩平衡:

$$M_{Oi} = aF_{Ai} \sin \alpha_i + l_x F_{Ai} \cos \alpha_i + l_x F_{Biz} - l_x F_{Ei} \sin \beta_i + 2eF_{Ei} \cos \beta_i \quad (3-31)$$

联立式(3-29), (3-30), (3-31), 得:

$$\begin{cases} F_{Oix} = -F_{Bix} + F_{Ai} \sin \alpha_i + F_{Ei} \cos \beta_i \\ F_{Oiz} = F_{Biz} + F_{Ai} \cos \alpha_i - F_{Ei} \sin \beta_i \\ M_{Oi} = aF_{Ai} \sin \alpha_i + l_x F_{Ai} \cos \alpha_i + l_x F_{Biz} - l_x F_{Ei} \sin \beta_i + 2eF_{Ei} \cos \beta_i \end{cases} \quad (3-32)$$

将式(3-32)变换为矩阵表达, 得:

$$F_i = \begin{bmatrix} F_{Oix} \\ F_{Oiz} \\ M_{Oi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \cos \beta_i \\ 0 & 1 & -\sin \beta_i \\ 0 & 1 & 2e \cos \beta_i - l_x \sin \beta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Bix} \\ F_{Biz} \\ F_{Ei} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{Ai} \sin \alpha_i \\ F_{Ai} \cos \alpha_i \\ aF_{Ai} \sin \alpha_i + l_x F_{Ai} \cos \alpha_i \end{bmatrix} \quad (3-33)$$

由上车轮受力分析式(3-18), 悬架摆臂受力分析式(3-23), 以及 1/4 车身受力分析式(3-33), 得到路面激励向 1/4 车身传递的动力学方程为:

$$F_i = \begin{bmatrix} F_{Oix} \\ F_{Oiz} \\ M_{Oi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & 0 \\ -(e+r) & l_w + l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{wix} \\ F_{wiz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ m_1 g \\ -(l_w + l_r)m_1 g \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} C_1 k_2 (\sin \alpha_i + \cos \alpha_i) & C_1 c_2 (\sin \alpha_i + \cos \alpha_i) & -m_1 \tan \beta_i \\ C_1 k_2 (\cos \alpha_i - \sin \alpha_i) & C_1 c_2 (\cos \alpha_i - \sin \alpha_i) & -m_1 \\ C_1 k_2 (l_x \cos \alpha_i + a \sin \alpha_i - l_x \sin \alpha_i) & C_1 c_2 (l_x \cos \alpha_i + a \sin \alpha_i - l_x \sin \alpha_i) & -l_x m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} \quad (3-34)$$

下面对力矩平衡机构进行分析, 以前力矩平衡机构为例, 受力分析如图 3-6 所示:

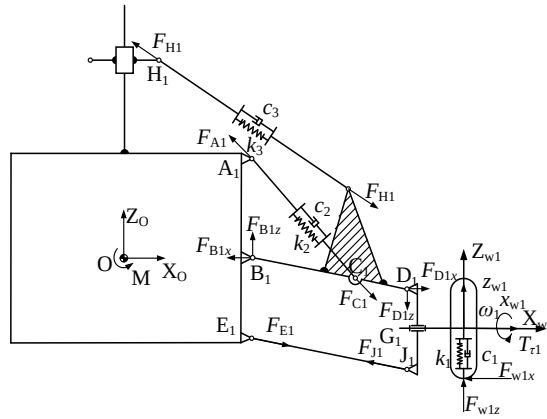


图 3-6 力矩平衡机构及 1/4 车身受力图

图中各符号对应的名称如下表 3-7 所示:

表 3-7 力矩平衡机构受力分析符号表

符号	名称	符号	名称
F_{Ai}	车身铰支座 A 受力	F_{Di}	上摆臂铰支座 D 受力
F_{Bi}	上摆臂铰支座 B 受力	x_{wi}	车轮横向位移
F_{Ei}	下摆臂铰支座 E 受力	h_i	滑块位移
F_{Hi}	力矩平衡机构滑块受力	k_3	力矩平衡机构阻尼器刚度
c_3	力矩平衡机构阻尼器阻尼	-	

将力矩平衡机构的滑块视为无质量无摩擦的理想滑块，滑块无外力作用时，力矩平衡机构弹簧阻尼器始终处于原长状态，滑块位移 h_i 是车轮垂向位移 z_i 的函数，两侧悬架所受激励不同，车轮处产生的垂向位移 z_i 不同，导致滑块产生的位移 h_i 也不同，滑块实际位移 h 几何关系表达如下式(3-35)所示：

$$h_i = \frac{bz_i}{d} + \sqrt{s_{h0}^2 - \left(l_x + b \sqrt{1 - \left(\sin \beta_0 - \frac{z_i}{d} \right)^2} \right)^2} - \sqrt{s_{h0}^2 - (l_x + b \cos \beta_0)^2} \quad (3-35)$$

两侧悬架所受激励不同，车轮处产生的垂向位移 z_i 不同，导致滑块产生的位移 h_i 也不同，两侧共用同一滑块，且两侧弹簧阻尼器相同，滑块实际位移 h 为：

$$h_i = \frac{b(z_l + z_r)}{2d} + \sqrt{s_{h0}^2 - \left(l_x + b \sqrt{1 - \left(\sin \beta_0 - \frac{z_l}{d} \right)^2} \right)^2} + \sqrt{s_{h0}^2 - \left(l_x + b \sqrt{1 - \left(\sin \beta_0 - \frac{z_r}{d} \right)^2} \right)^2} - \sqrt{s_{h0}^2 - (l_x + b \cos \beta_0)^2} \quad (3-36)$$

上式中，力矩平衡机构减振器长度用 s_h 表示， s_h 是车轮垂向位移 z_i 的函数，用 z_l 和 z_r 代表左右两侧车轮的垂向位移， s_{h0} 为初始安装长度。

滑块运动导致两侧弹簧阻尼器分别被拉长和压缩，变形量用 p 表示，几何关系表达式为：

$$p_l = \sqrt{\left(l_x + b \sqrt{1 - \left(\sin \beta_0 - \frac{z_l}{d} \right)^2} \right)^2} + \left(\sqrt{s_{h0}^2 - \left(l_x + b \sqrt{1 - \left(\sin \beta_0 - \frac{z_r}{d} \right)^2} \right)^2} + \frac{b(z_l + z_r)}{2d} \right)^2 - s_{h0} \quad (3-37)$$

$$p_r = \sqrt{\left(l_x + b\sqrt{1 - \left(\sin \beta_0 - \frac{z_r}{d}\right)^2}\right)^2 + \left(\sqrt{s_{h0}^2 - \left(l_x + b\sqrt{1 - \left(\sin \beta_0 - \frac{z_l}{d}\right)^2}\right)^2} + \frac{b(z_l + z_r)}{2d}\right)^2} - s_{h0} \quad (3-38)$$

上式中下标 l, r 分别表示车身左右两侧，其中用 p_l 表示力矩平衡机构左侧弹簧阻尼器变形量。

此时力矩平衡机构弹簧阻尼器受 F_H 为：

$$F_H = k_3 p + c_3 \dot{p} \quad (3-39)$$

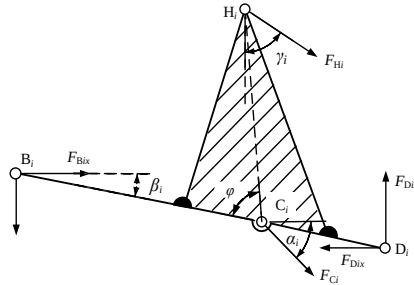


图 3-7 力矩平衡机构受力图

力矩平衡机构弹簧阻尼器受力 F_H 通过悬架通道反向作用于车轮，作用力记作 $F_\Delta = [F_{\Delta x} \ F_{\Delta z}]^T$ 。由车轮及悬架摆臂机构动力学分析，得出力矩平衡机构弹簧阻尼器受力 F_{Hi} 对车轮产生的反作用力 F_Δ 传递的作用方程。

1/4 小车增加力矩平衡机构后，上摆臂受力由力矩平衡机构弹簧阻尼器下铰接点向其余铰接点的传递方程为：

$$\begin{cases} F_{Bx} + F_C \cos \alpha_i - F_{Dx} + F_H \sin \gamma_i = 0 \\ -F_{Bz} - F_C \sin \alpha_i + F_{Dz} - F_H \cos \gamma_i = 0 \\ -cF_{Dx} \sin \beta + cF_{Dz} \cos \beta - bF_{Bx} \sin \beta_i + bF_{Bz} \cos \beta + l_{CH} \cos(\beta + \varphi)F_H \cos \gamma - l_{CH} \sin(\beta + \varphi)F_H \sin \gamma = 0 \end{cases} \quad (3-40)$$

以矩阵形式表达：

$$\begin{bmatrix} -\sin \gamma_i \\ \cos \gamma_i \\ l_{CH} (\sin(\beta_i + \varphi) \sin \gamma_i - \cos(\beta_i + \varphi) \cos \gamma_i) \end{bmatrix} F_H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cos \alpha_i & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -\sin \alpha_i & 0 & 1 \\ -b \sin \beta_i & \sin \beta_i & 0 & -c \sin \beta_i & c \cos \beta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Bx} \\ F_{Bz} \\ F_C \\ F_{Dx} \\ F_{Dz} \end{bmatrix} \quad (3-41)$$

反作用力的两项分量按摆臂角比例分配，可以得到车轮的动载荷 $F_{\Delta z}$ ，具体表达为：

$$F_{\Delta z} = F_{\Delta x} \tan \beta_i^{-1} \quad (3-42)$$

结合车轮受力分析式(3-18)，减振器动力学方程式(3-23)，得出力矩平衡机构弹簧阻尼器受力 F_{Hi} 对车轮的反作用力 F_{Δ} 方程为：

$$\begin{aligned} d \sin \beta_i F_{\Delta x} - d \cos \beta_i F_{\Delta z} = [l_{CH} \cos(\beta_i + \varphi + \gamma_i) - b \cos(\beta_i + \gamma_i)] F_{Hi} \\ - b \sin(\alpha_i - \beta_i)(k_3 z + c_3 \dot{z}) + d \sec \beta_i m_1 \ddot{z}_i \end{aligned} \quad (3-43)$$

3.2.3 车轮运动动力学模型

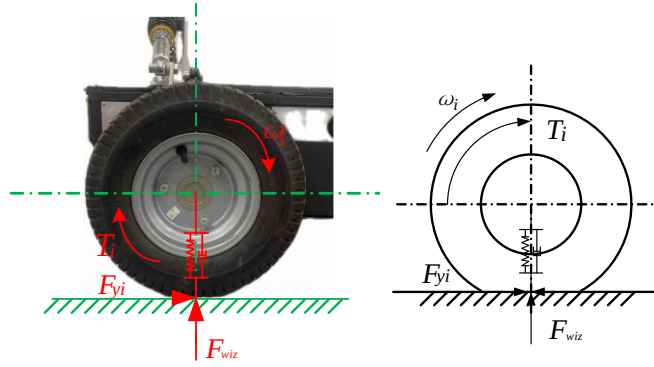


图 3-8 车轮受力运动分析示意图

对于单个车轮，车轮受力和运动如图 3-8 所示，通过车轮的受力分析得，车轮的运动方程表达式如下^[27]：

$$J_w \dot{\omega}_i = T_i - F_{yi} r \quad (3-44)$$

上式中， J_w 为车轮的转动惯量， ω_i 为车轮转速， r 为车轮半径， F_{yi} 为车轮牵引力，计算如第 2.2.2 节介绍所示，具体方程如下所示：

$$F_{yi} = F_{zi} \mu(\lambda_i) \quad (3-45)$$

联立式(2-4)，(2-6)，(3-43)可以得到车轮的牵引力 F_{yi} 的大小。

两侧驱动力矩差 ΔT 为：

$$\Delta T = \left| \left((F_{y1} + F_{y2}) - (F_{y3} + F_{y4}) \right) \right| r + J_w \dot{\omega}_l + J_w \dot{\omega}_r \quad (3-46)$$

3.3 整车动力学模型

3.3.1 整车动力学模型分析

移动机器人整车受力为 1/4 车身受力之和，即 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 之和，如图 3-9 所示为多地形移动机器人整车结构简图。

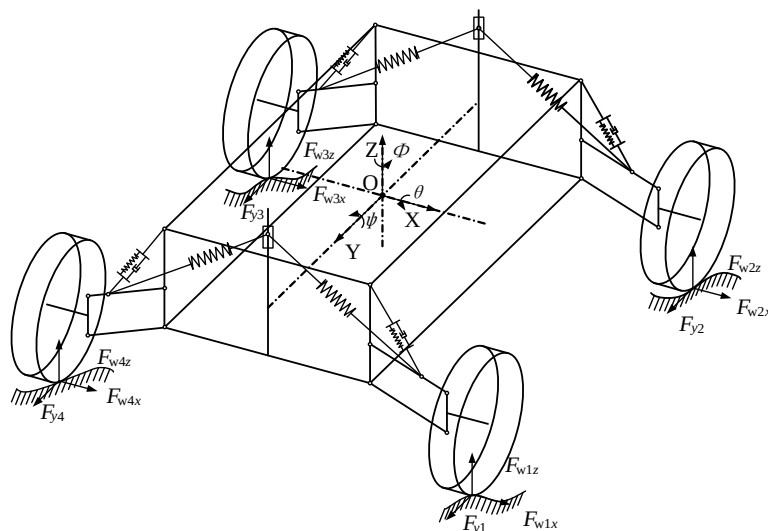


图 3-9 多地形移动机器人整车结构简图

如表 3-8 所示为多地形移动机器人整车动力学模型符号表：

表 3-8 整车动力学模型符号表

符号	名称	符号	名称
M	整车质量	V_y	整车纵向速度
V_x	整车横向速度	Φ	车身横摆角速度
θ	车身俯仰角速度	ψ	车身侧倾角速度
F_{yi}	轮胎牵引力	F_{Oix}	1/4 小车横向受力
F_{Oiz}	1/4 小车垂向力	F_{roll}	道路阻力
V_z	整车纵向速度	F_{Oiy}	1/4 小车纵向受力
I_z	整车垂向转动惯量	I_x	整车横向转动惯量

列写整车动力学方程：

$$F = \begin{bmatrix} F_x & F_y & F_z & M_x & M_y & M_z \end{bmatrix}^T \quad (3-47)$$

纵向运动：

$$M(\dot{V}_y + V_x \dot{\Phi}) = F_{O1y} + F_{O2y} + F_{O3y} + F_{O4y} \quad (3-48)$$

横向运动：

$$M(\dot{V}_x + V_y \dot{\Phi}) = F_{O1x} + F_{O2x} + F_{O3x} + F_{O4x} \quad (3-49)$$

垂向运动：

$$M\dot{V}_z = F_{O1z} + F_{O2z} + F_{O3z} + F_{O4z} \quad (3-50)$$

横摆运动：

$$I_z \dot{\Phi} = (F_{O1x} + F_{O2x} + F_{O3x} + F_{O4x})l_y + (F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4})(l_y + d \cos \beta_i + h) \quad (3-51)$$

侧倾运动：

$$I_y \dot{\psi} = M_{O1} + M_{O2} + M_{O3} + M_{O4} \quad (3-52)$$

俯仰运动：

$$I_x \dot{\theta} = (-F_{O1z} - F_{O2z} + F_{O3z} + F_{O4z})l_x \quad (3-53)$$

整车受力 $\mathbf{F}$ 为 1/4 小车受力向量 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{F}_3, \mathbf{F}_4$ 对整车质心的贡献，表达式为：

$$\mathbf{F} = \eta_1 \mathbf{F}_1 + \eta_2 \mathbf{F}_2 + \eta_3 \mathbf{F}_3 + \eta_4 \mathbf{F}_4 \quad (3-54)$$

其中 $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ 为 1/4 车身受力向量 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{F}_3, \mathbf{F}_4$ 对整车质心受力贡献矩阵。

$\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ 表达式分别为：

$$\eta_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -l_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -l_y & 0 & 0 & -(l_y + d \cos \beta + l_w) \end{bmatrix} \quad \eta_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & l_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ l_y & 0 & 0 & -(l_y + d \cos \beta + l_w) \end{bmatrix}$$

$$\eta_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & l_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -l_y & 0 & 0 & l_y + d \cos \beta + l_w \end{bmatrix} \quad \eta_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & l_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -l_y & 0 & 0 & l_y + d \cos \beta + l_w \end{bmatrix} \quad (3-55)$$

3.3.2 参数计算

根据整车动力学方程建模，建立 MATLAB/Simulink 计算模型，如图 3-11 所示，代入表 3-9 所示相关参数计算。

表 3-9 计算参数表

参数	值	参数	值
车轮刚度 $k_1/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	100	车轮阻尼 $c_1/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	1
减振器刚度 $k_2/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	40	减振器阻尼 $c_2/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	0.8
车轮部件质量 m_1/kg	5	簧上质量 m_2/kg	18.5
铰支座 A、B 间距 a/mm	226	上摆臂 B、C 间距 b/mm	91
铰支座 C、D 间距 c/mm	26	下摆臂杆长 d/mm	117
车轮半径 r/mm	159	减振器原长 s_0/mm	270
车轮与地面间摩擦系数 μ	0.5	车轮滚阻系数 ν	0.015
减振器工作角 α	16.38°	摆臂角 β	20°
力矩平衡机构滑块工作角 γ_I	12.18°	车身宽度 l_x/mm	175
车身长度 l_y/mm	400		

为验证理论模型计算的正确性，对四轮施加如下表 3-10 所列的不同激励信号，得出移动机器人整车速度以及四轮转速随时间变化响应曲线。

表 3-10 输入参数表

参数	轮 1	轮 2	轮 3	轮 4
轮速	200 r/min	200 r/min	200 r/min	200 r/min
横向激励	50 N	100 N	100 N	200 N
垂向激励	100 N	200 N	50 N	100 N

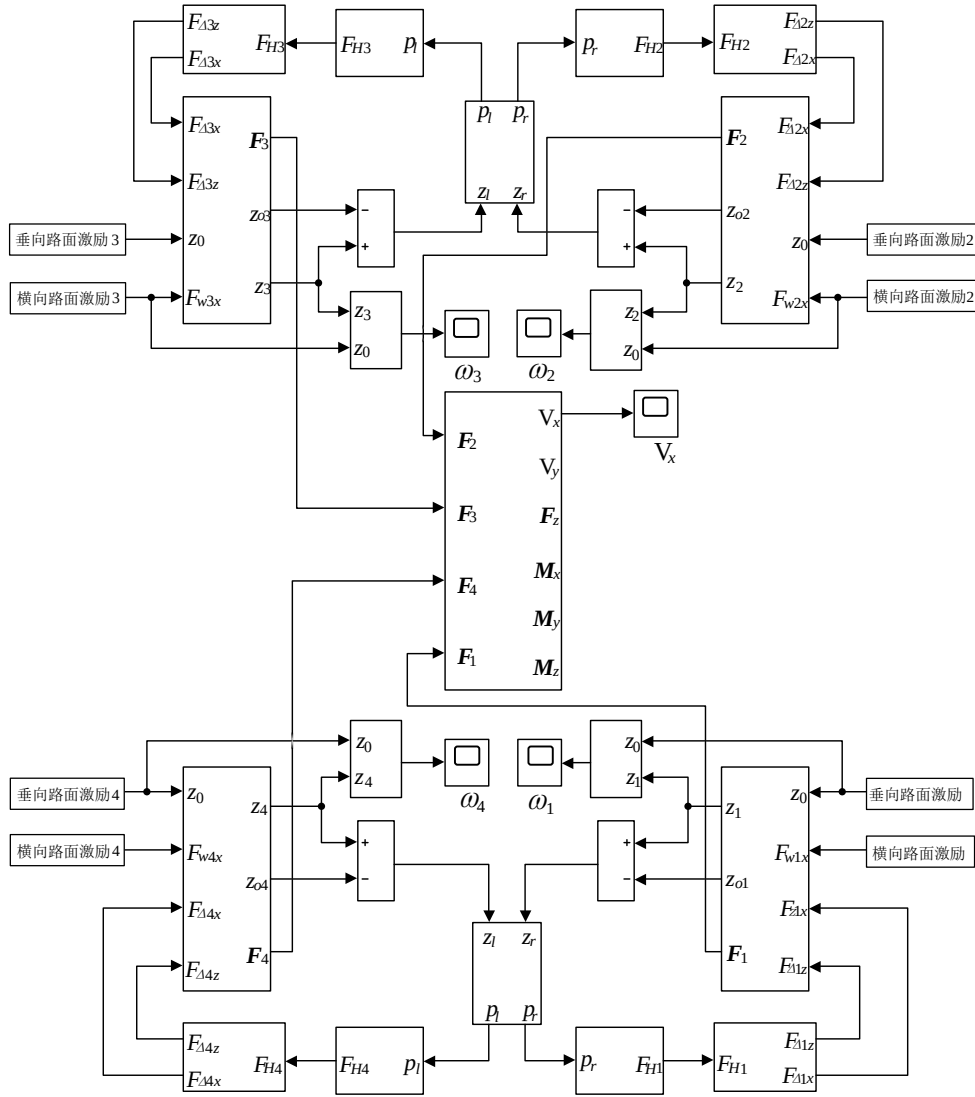


图 3-11 多地形移动机器人 MATLAB/Simulink 动力学模型

多地形移动机器人纵向速度以及四轮转速仿真响应如图 3-12，图 3-13 所示：

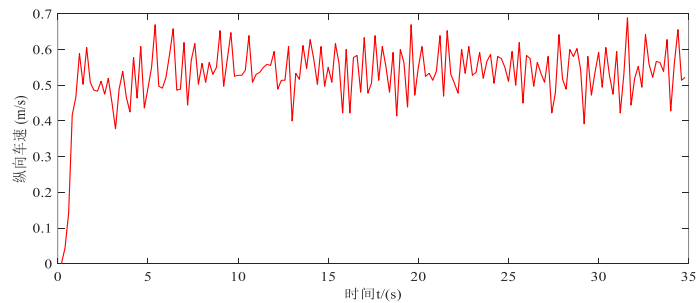


图 3-12 多地形移动机器人纵向速度

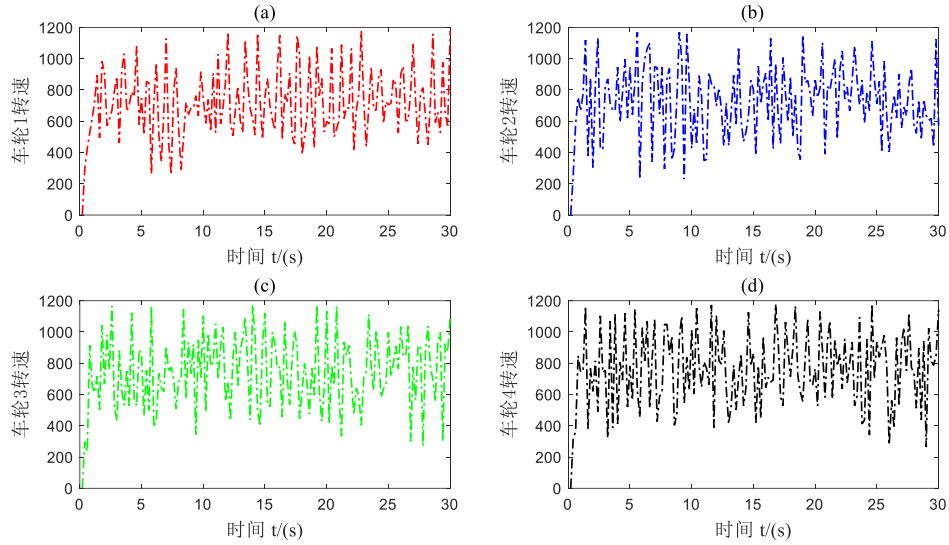


图 3-13 多地形移动机器人四轮输出轮速

仿真结果如表 3-10 所示：

表 3-10 仿真输出主要参数表

参数	峰值	均方根值
车速(m/s)	0.68	0.34
车轮 1 转速(r/min)	1090	751
车轮 2 转速(r/min)	1186	808
车轮 3 转速(r/min)	1162	799
车轮 4 转速(r/min)	1194	821

3.4 本章小结

针对动态路面激励对多地形移动机器人车轮滑移率的影响，本章基于第 2 章移动机器人滑移机理分析，建立了路面激励的动力学模型，在其基础上建立了 1/4 车身的动力学模型，推导了路面激励下的车轮动载荷的动力学方程，将其与车轮运动方程相结合建立车轮运动动力学模型，采用 MATLAB/Simulink 搭建了路面-移动机器人-车轮综合动态模型，量化了路面激励对移动机器人车速以及四轮转速的影响，为后续章节滑移率预测控制系统的设计奠定基础。

第 4 章 基于动态模型的 NMPC 滑移率预测控制系统研究

4.1 引言

多地形移动机器人滑移率控制系统是移动机器人运动控制领域不可忽视的重要研究内容之一，考虑到移动机器人日常工况大多为随机路面以及其本身就是一个复杂的非线性系统，尤其在路面激励的干扰下，传统的控制算法则存在一定的局限性，为了有效抑制动态路面激励下的移动机器人的滑移率，提高其牵引力转化效果，本章基于第 3 章建立的综合动态模型，提出了一种基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统。

4.2 基于滑移机理分析的控制模型搭建

4.2.1 路面最滑移率预测模型

从 2.2.2 节的分析得知，最优滑移率一般出现在路面附着系数的峰值附近，为了准确找到这个最优点，需要建立一个 μ - s 理论模型预测滑移率与路面附着力之间的联系。在目前广泛使用的模型中，Kiencke μ - λ 模型和 Burckhardt μ - λ 模型备受关注^[66]。Burckhardt 模型是基于“魔术轮胎”公式的理论变形和仿真验证，由 Burckhardt 等人提出的经验模型，该模型采用一个包含五个参数的公式来拟合轮胎的实验数据，旨在描述路面附着系数与滑移率之间的关系，该模型的公式通常形式如下^[67]：

$$\mu(\lambda_i) = [c_1(1 - e^{-c_2 \cdot \lambda_i}) - c_3 \cdot \lambda_i] \cdot \zeta \quad (4-1)$$

其中， c_1 、 c_2 、 c_3 为路面系数， ζ 与多地形移动机器人的纵向速度和车轮垂直载荷有关，其表达式如下所示：

$$\zeta = -e^{c_4 \cdot s_i \cdot V_y} (1 - c_5 F_{zi}^2) \quad (4-2)$$

根据一般情况， c_4 通常约为 0.04，而 c_5 一般取值为 0.00151，在 λ_i 为 10%，纵向速度 V_y 为 0.5m/s 以及垂向力为 400N 的情况下，计算得到 ζ 约为 0.90，因此，可粗略估计 ζ 对附着系数的影响大约为 10%。考虑到这一影响相对较小，为简化计算，可将 ζ 近似设为 1，则式(4-1)可简化为以下形式：

$$\mu(\lambda_i) = c_1(1 - e^{-c_2 \cdot \lambda_i}) - c_3 \cdot \lambda_i \quad (4-3)$$

为了求得峰值附着系数 μ_{max} 对应的最优滑移率 λ_{opt} ，可对上式滑移率求导并令结果等于零，得到最优滑移率的预测模型如下式所示：

$$\lambda_{opt} = -\frac{1}{c_2} \ln \frac{c_3}{c_1 c_2} \quad (4-4)$$

以及对应的峰值附着系数 μ_{max} 为：

$$\mu_{max} = c_1 + \frac{c_3}{c_2} \ln \frac{c_3}{c_1 c_2 \cdot e} \quad (4-5)$$

参数 c_1 、 c_2 、 c_3 与路面之间的关系可以从表 4-1 中获得^[60]。各种路面的滑移率-路面摩擦系数 μ - λ 特性曲线如图 4-1 所示。从图中可以观察到，在冰的路面上，摩擦系数最低，表明驱动性能最差；在干燥的沥青路面上，附着系数达到最高，这意味着驱动性能最佳。另外，随着路面摩擦特性的减弱，各种路面在非稳定区的 μ - λ 曲线变得更加平缓。这说明在摩擦系数较低的路面上，滑移率的增加对驱动性能的影响较小。

表 4-1 不同路面下的 Burckhardt 模型参数表

路面条件	c_1	c_2	c_3
干沥青	1.2802	23.95	0.50
湿沥青	0.855	33.822	0.343
干混凝土	1.1970	25.1503	0.5365
湿鹅卵石	0.4000	33.7020	0.1203
雪	0.1901	94.119	0.0645
冰	0.04	306.35	0

依据表 4-1 不同路面下的 Burckhardt 模型参数表，通过撰写 Matlab .m 脚本文件，运行得到如图 4-1 所示的不同路面下的 μ - λ 曲线图。

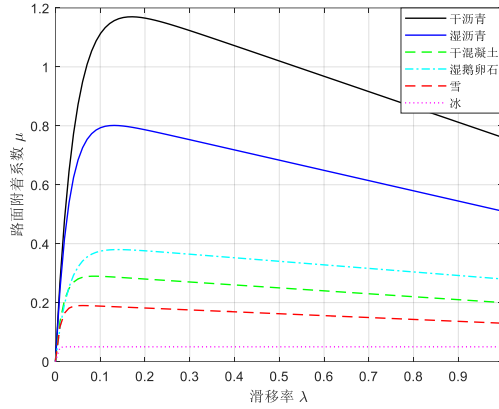


图 4-1 不同路面下的 μ - λ 曲线图

4.2.2 驱动电机控制模型

多地形移动机器人采用伺服控制电机本质上属于永磁同步电机类型，永磁同步电机因其结构简单、体积小、功率因数高等特点而备受青睐，特别适用于需要高响应、宽调速和高精度定位的控制系统^[68-71]。永磁同步电机物理模型如图 4-2 所示，同时为了简化电机数学模型，作出以下 2 点假设：

- (1) 忽略电机内部的涡流和磁滞损耗；
- (2) 电机中的电流为对称的三相正弦波电流。

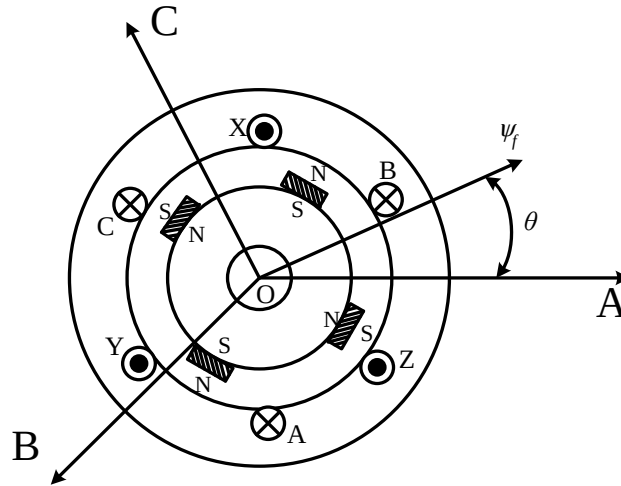


图 4-2 永磁同步电机物理模型

如图 4-2 所示为 A-B-C 三相静止坐标系下永磁同步电机的物理模型，其中，OA，OB，OC 代表定子绕组的轴线，而转子轴线与 A 定子的夹角定义为 θ ，相关参数见表 4-2。

表 4-2 永磁同步电机模型参数表

符号	名称	符号	名称
U_A	A 相定子绕组电压	U_B	B 相定子绕组电压
U_C	C 相定子绕组电压	I_A	A 相定子绕组电流
I_B	B 相定子绕组电流	I_C	C 相定子绕组电流
ψ_A	A 相定子绕组磁链	ψ_B	B 相定子绕组磁链
ψ_C	C 相定子绕组磁链	ψ_f	转子磁场的等效磁场

建立永磁同步电机物理模型如下所示：

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_A & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 \\ 0 & 0 & R_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 0^\circ & \cos 120^\circ & \cos 240^\circ \\ \cos 240^\circ & \cos 120^\circ & \cos 0^\circ \\ \cos 120^\circ & \cos 240^\circ & \cos 0^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_A I_A \\ L_B I_B \\ L_C I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta - 240^\circ) \end{bmatrix} \psi_f \quad (4-7)$$

在矢量控制永磁同步电机中，将定子侧参数转换到转子坐标系中是必要的。首先，通过 Clarke 变换，将定子三相静止坐标系转换为两相静止坐标系，然后再通过 Park 变化将两相静止坐标系转换为转子两相旋转坐标系，具体公式如下：

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

经过式(4-8)，(4-9)的变换，得到永磁同步电机位于 d-q 坐标系下的磁链方程：

$$\psi_d = L_d I_d + \psi_f \quad (4-10)$$

$$\psi_q = L_q I_q \quad (4-11)$$

进一步得到永磁同步电机位移 d-q 坐标系下的电压方程：

$$U_d = R_s I_d + p_n \psi_d - \omega_r \psi_q = R_s I_d + \frac{d}{dt} (L_q I_q + \psi_f) - \omega_r L_q I_q \quad (4-12)$$

$$U_q = R_s I_q + p_n \psi_q - \omega_r \psi_d = R_s I_q + \frac{d}{dt} L_q I_q + \omega_r (L_q I_q + \psi_f) \quad (4-13)$$

永磁同步电机的位于 d-q 坐标系的电流方程：

$$\frac{d}{dt} I_d = \frac{1}{L_d} (U_d - R_s I_d + \omega_r L_q I_q) \quad (4-14)$$

$$\frac{d}{dt} I_q = \frac{1}{L_q} (U_q - R_s I_q - \omega_r L_d I_d - \omega_r \psi_f) \quad (4-15)$$

永磁同步电机的转矩方程为：

$$T_e = \frac{3}{2} p_n (\psi_d - I_d - \psi_d I_d) = \frac{3}{2} p_n [\psi_f I_q + (L_d - L_q) I_d I_q] \quad (4-16)$$

则永磁同步电机的状态空间方程为：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_q \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & -\frac{\psi_f}{L} \\ \frac{3p_n \psi_f}{2J_m} & \frac{-B}{J_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_q \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U_q}{L} \\ \frac{-T_n}{J_m} \end{bmatrix} \quad (4-17)$$

4.3 基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统设计

4.3.1 总体控制系统搭建和滑移率控制模型建立

基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统，旨在通过调节四轮的扭矩输出，限制驱动轮的滑移率维持在一个稳定的范围内的同时降低两侧车轮的驱动力矩差，从而避免驱动轮的过度滑移，提高移动机器人的牵引力，获得较好的运动性能和车身稳定性^[52, 72, 73]。

表 4-3 滑移率控制模型参数表

符号	名称	符号	名称
λ_i	驱动轮实时滑移率	λ_{opt}	当前路面最优滑移率
T_i	驱动轮输出力矩命令	T_{max}	驱动轮最大力矩值
F_{yi}	车轮牵引力	$\mu(\lambda_i)$	当前路面附着系数
V_y	移动机器人纵向车速	J_{wi}	驱动轮转动惯量

多地形移动机器人滑移率控制系统框图如图 4-3 所示，基于当前时刻多地形移动机器整车动力学模型，通过路面最佳滑移率预测模型，得到当前路面的最优滑移率并确定滑移率稳定区间；同时，整车动力学模型输出当前时刻的驱动轮轮

速，通过电机预测模型得到驱动力矩的约束范围。NMPC 滑移率控制器综合考虑约束问题，通过构造不同的目标函数对问题进行求解，最后得到四个驱动轮的优化后的驱动力矩。

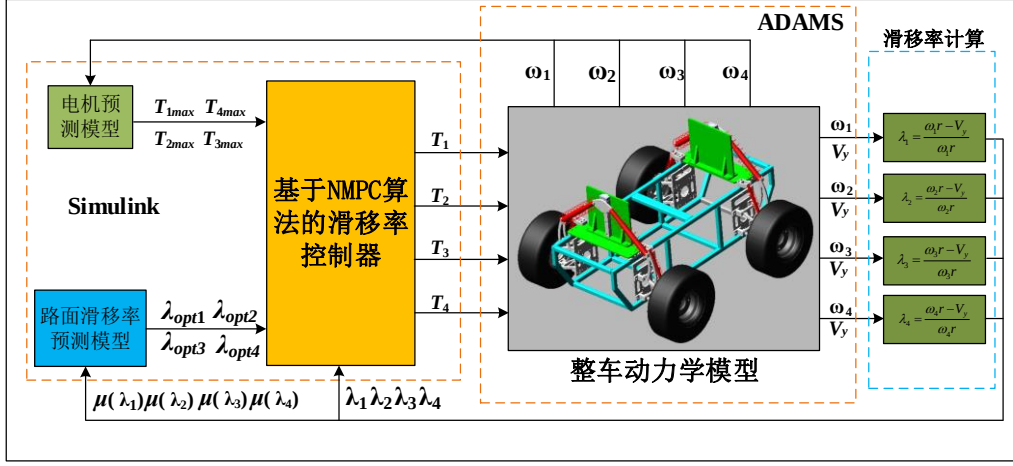


图 4-3 多地形移动机器人滑移率预测控制系统框图

根据第 2.2.2 节滑移率公式(2-1)，对公式进行求导，得到：

$$\dot{\lambda}_i = \frac{\omega_i V_y - \omega_i V_y}{r \omega_i^2} \quad (4-18)$$

代入式(2-2)，(2-3)，(2-4)，整理化简得到滑移率微分方程：

$$\dot{\lambda}_i = \frac{T_i V_y}{J_i r \omega_i^2} - \mu(\lambda_i) \left(\frac{F_{zi} V_y}{J_i \omega_i^2} + \frac{\sum_{i=1}^4 F_{zi} - F_{roll}}{M r \omega_i} \right) \quad (4-19)$$

代入式(2-5)，得滑移率的控制模型为：

$$\dot{\lambda}_i = \frac{T_i V_y}{J_i r \omega_i^2} - \frac{2 \mu_{\max} \lambda_i \lambda_{opt}}{\lambda_i^2 + \lambda_{opt}^2} \left(\frac{F_{zi} V_y}{J_i \omega_i^2} + \frac{\sum_{i=1}^4 F_{zi} - F_{roll}}{M r \omega_i} \right) \quad (4-20)$$

根据滑移率控制模型(4-20)，列写基于 NMPC 算法的多地形移动机器人滑移率控制系统状态空间方程：

$$\dot{x}_i = \frac{T_i V_y}{J_i r \omega_i^2} - \frac{2 \mu_{\max} \lambda_i \lambda_{opt}}{x_i^2 + \lambda_{opt}^2} \left(\frac{F_{zi} V_y}{J_i \omega_i^2} + \frac{\sum_{i=1}^4 F_{zi} - F_{roll}}{M r \omega_i} \right) \quad (4-21)$$

其中，状态变量 x ，控制变量 u ，输出变量 y 分别如下所示：

$$\begin{cases} x = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4-22)$$

为了转换问题为便于求解的有限维优化控制问题，我们使用欧拉方法对系统状态空间方程进行离散处理，在采样时刻 k ，通过数学变换，得到状态变量 x ，控制变量 u 以及输出变量 y 的离散形式， Δt 代表采样步长：

$$x(k+1) = f^k(x(k), u(k)) \cdot \Delta t + x(k) \quad (4-23)$$

$$y_i(k) = C^k x_i(k) \quad (4-24)$$

将式(4-23)代入滑移率控制系统状态空间方程(4-21)，整理可得状态空间方程的离散形式：

$$x(k+1) = \left[\frac{T_i V_y}{J_i r \omega_i^2} - \frac{2\mu_{\max} \cdot x(k) \cdot \lambda_{opt}}{x(k)^2 + \lambda_{opt}^2} \left(\frac{F_{zi} V_y}{J_i \omega_i^2} + \frac{\sum_{i=1}^4 F_{zi} - F_{roll}}{Mr \omega_i} \right) \right] \Delta t + x(k) \quad (4-25)$$

式中， f^k 表示系统状态变量 x 在 k 时刻的变化梯度，由式(4-24)可以得到输出矩阵为：

$$C_y = \text{diag}(1;1;1;1) \quad (4-26)$$

在采样时刻 k ，系统的控制序列 $U(k)$ 和预测输出序列 $Y(k)$ 如下所示：

$$U(k) = \begin{bmatrix} u(k|k) \\ u(k+1|k) \\ \vdots \\ u(k+N_c-1|k) \end{bmatrix}, Y(k) = \begin{bmatrix} y(k+1|k) \\ y(k+2|k) \\ \vdots \\ y(k+N_p|k) \end{bmatrix} \quad (4-27)$$

其中， N_p 表示系统的预测时域， N_c 表示控制时域，由 NMPC 算法可知：

$$N_p > N_c > 1 \quad (4-28)$$

将驱动轮的最佳滑移率 λ_{opti} 作为参考输出 $r(k)$ ，随路面摩擦系数 $\mu(\lambda_i)$ 变换而变化，同时 $r(k)$ 为参考输出序列 $R(k)$ 的一个元素，具体定义为：

$$r(k) = \begin{bmatrix} \lambda_{opt1}(k) \\ \lambda_{opt2}(k) \\ \lambda_{opt3}(k) \\ \lambda_{opt4}(k) \end{bmatrix}, R(k) = \begin{bmatrix} r(k) \\ r(k) \\ \vdots \\ r(k) \end{bmatrix} \quad (4-29)$$

同理，控制输入的变化量 $\Delta u(k)$ 和控制输入序列 $\Delta U(k)$ 为：

$$\begin{cases} \Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ \Delta u(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_c-1|k) \end{bmatrix} \\ \Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \end{cases} \quad (4-30)$$

注意当 k 超过控制时域时，此时 $\Delta U(k)=0$ 。

在采样时刻(k)时， $x(k)$ 被用作预测的起点，其值被设定为预测过程开始时的状态值 $x(k|k)$ 。系统的状态预测和输出预测将遵循公式(4-29)和(4-30)进行更新，即在每个采样周期结束时，系统的状态和输出量会根据当前状态值和上一时刻的系统输入进行更新计算。这产生的控制量（四个驱动轮的转矩指令 T_i ）将在下一个采样时刻施加到系统上。在下一个采样时刻 $k+1$ ，控制器将基于移动机器人动力学模型反馈的最新状态测量值解决新的优化控制问题。该方法不仅可以基于当前时刻的初始状态值进行运算，还能够对未来采样值进行预测并求解，确保输入变量和状态量的连续更新，从而有效控制移动机器人车轮的滑移率，更新流程如下所示：

$$\begin{aligned} x(k+1|k) &= f^k((x(k|k), u(k|k))\Delta t + x(k|k)); \\ x(k+2|k) &= f^k((x(k+1|k), u(k+1|k))\Delta t + x(k+1|k)); \\ &\vdots \\ x(k+N_c|k) &= f^k((x(k+N_c-1|k), u(k+N_c-1|k))\Delta t + x(k+N_c-1|k)); \end{aligned} \quad (4-31)$$

$$\begin{aligned} y(k+1|k) &= C_y(f^k x(k|k), u(k|k)\Delta t + x(k|k)); \\ y(k+2|k) &= C_y(f^k x(k+1|k), u(k+1|k)\Delta t + x(k+1|k)); \\ &\vdots \end{aligned}$$

$$y(k+N_p|k) = C_y(f^k x(k+N_p-1|k), u(k+N_p-1|k)\Delta t + x(k+N_p-1|k)); \quad (4-32)$$

4.3.2 基于滑移率控制模型的目标函数设计

为了实现多地形移动人滑移率的精确控制，求解滑移率优化控制系统问题，依据之前第 4.3.1 节控制问题分析中提出的多目标约束优化控制问题来设计目标函数。基于 NMPC 算法列写各个控制目标以及在 k 时刻的目标函数，最后写出总体的目标函数。

(1)目标 1：为移动机器人提供尽可能大的纵向力，确保良好的加速性能的同时确保车轮滑移率保持在一个稳定的区间内，通过构建目标函数 J_1 来有效控制每个轮胎的滑移率，当移动机器人起步时，滑移率很小，即可能出现 $\frac{1}{y(k+i|k)^2} \rightarrow \infty$ 的情况，为了出现 J_1 无穷大的情况，在分母中加入 ε^2 。

$$J_1 = \sum_{i=1}^{N_p} Q \left[\frac{1}{y(k+i|k)^2 + \varepsilon^2} \right] = \sum_{i=1}^{N_p} \left[\left(\frac{Q_1}{\lambda_1(k+i|k)^2 + \varepsilon^2} \right) + \left(\frac{Q_2}{\lambda_2(k+i|k)^2 + \varepsilon^2} \right) + \left(\frac{Q_3}{\lambda_3(k+i|k)^2 + \varepsilon^2} \right) + \left(\frac{Q_4}{\lambda_4(k+i|k)^2 + \varepsilon^2} \right) \right] \quad (4-33)$$

式中， ε 的添加是防止出现分母为零的情况，经过大量仿真实验，设定 $\varepsilon=0.001$ ， Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 为加权因子，分别调节四个驱动轮的滑移率优化效果，加权矩阵计算如下：

$$Q = \text{diag}(Q_1; Q_2; Q_3; Q_4) \quad (4-34)$$

(2)目标 2：由于轮胎纵向牵引力的越大并不等同于整车性能越好，引入目标函数 J_2 与目标函数 J_1 实现移动机器人性能与系统约束之间的平衡关系。避免轮胎纵向力过大导致横向力减小，导致移动机器人失稳。

$$J_2 = \sum_{i=1}^{N_p} \|y(k+i|k) - r(k+i)\|^2 = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^4 \left[P_i (\lambda_i(k+i|k) - \lambda_{opti}(k))^2 \right] \quad (4-35)$$

式中， $r(k+i)$ 表示四个驱动轮的最优滑移率，随着路面附着系数 $\mu(\lambda_i)$ 的变化而变化，即

$$r(k+i) = \lambda_{opti}(k) \quad (4-36)$$

P 为加权矩阵, 结合目标函数 1 的加权因子 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 分别调节移动机器人的驱动轮, P 的计算如下:

$$P = \text{diag}(P_1; P_2; P_3; P_4) \quad (4-37)$$

(3)目标 3: 移动机器人两侧车轮驱动力矩变化量 ΔT_i 不能过大,否则会使得移动机器人一侧车轮突破路面附着极限, 车轮滑移率增大, 增加了车轮滑移的几率, 因此使得力矩变化量的平方和 $\sum T_i^2$ 尽可能小来保证抑制移动机器人的车轮滑移, 通过引入目标函数 J_3 来调节驱动力矩的变化量。

$$J_3 = \sum_{i=0}^{Nc-1} \left\| \Delta u(k+i|k) \right\|_S^2 = \sum_{i=0}^{Nc-1} \left[s \Delta T_f(k+i|k)^2 + \Delta T_r(k+i|k)^2 \right] \quad (4-38)$$

S 为加权矩阵, 计算如下:

$$S = \text{diag}(s; s; s; s) \quad (4-39)$$

(4)目标 4: 移动的机器人的驱动力矩越大, 越容易发生电机过载和车轮堵转的情况, 因此在保证小车性能的前提下, 驱动轮力矩 T_i 越小越好。即四个驱动轮力矩平方和 $\sum T_i$ 越小越好, 通过构建目标函数 J_4 调节驱动车轮输出力矩。

$$J_4 = \sum_{i=0}^{Nc-1} \left\| u(k+i|k) \right\|_R^2 = \sum_{i=0}^{Nc-1} \left[r(T_1(k+i|k))^2 + T_2(k+i|k)^2 + T_3(k+i|k)^2 + T_4(k+i|k)^2 \right] \quad (4-40)$$

为确保控制问题的可求解性, 对状态变量 λ_i 引入了松弛变量 $\sigma_{i(opt)}$, 适度放宽约束条件。为了表征 $\sigma_{i(opt)}$ 对控制性能的影响, 在目标函数中添加针对 $\sigma_{i(opt)}$ 的惩罚项 J_5 。

$$s.t. \quad 0 \leq \lambda_i(k+i|k) \leq \lambda_i + \sigma_{i(opt)}, \quad \sigma_{i(opt)} > 0 \quad (4-41)$$

联立式(4-33), (4-35), (4-38), (4-40)得到多地形移动机器人滑移率优化控制系统的总目标函数 J , 具体表达如下所示:

$$\begin{aligned} \min J(x(k), U(k)) &= J_1 + J_2 + J_3 + J_4 \\ &= \sum_{i=1}^{Np} Q \left[\frac{1}{y(k+i|k)^2 + \varepsilon_2} \right] + \sum_{i=1}^{Np} \left\| y(k+i|k) - r(k+i) \right\|_P^2 \\ &\quad + \sum_{i=0}^{Np-1} \left\| \Delta u(k+i|k) \right\|_S^2 + \sum_{i=0}^{Np-1} \left\| u(k+i|k) \right\|_R^2 + \sum_{j=1}^4 \left\| \sigma_{i(opt)} \right\|_\eta^2 \end{aligned} \quad (4-42)$$

由于电机最大力矩的限制约束，即 $T_i(k) \leq T_{max}$ ，作为控制系统时变硬约束的具体形式为：

$$s.t. \quad |T_i(k+i)| \leq T_{max}, (i=0,1,\dots,N_c-1) \quad (4-43)$$

由于车轮滑移率稳定区间约束，即 $0 \leq \lambda_i(k) \leq \lambda_{opt}$ ，作为控制系统时变硬约束的具体形式为：

$$s.t. \quad 0 \leq \lambda_i(k+i|k) \leq \lambda_i + \sigma_{i(opt)}, (\sigma_{i(opt)} > 0, i=1,\dots,N_p) \quad (4-44)$$

如图 4-4 所示，为多地形移动机器人基于 NMPC 滑移率预测控制算法的流程框图，同时采用 MATLAB 的 NGA 工具箱中的 e04wd 函数对设计的多目标约束函数进行求解。

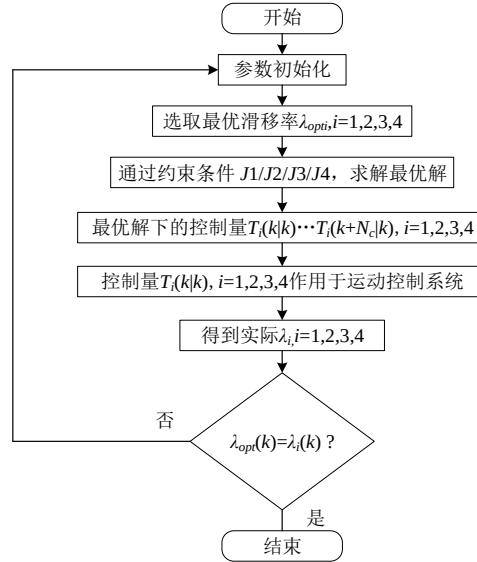


图 4-4 基于 NMPC 滑移率预测控制算法的流程框图

4.4 本章小结

本章主要分析了基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统的多地形移动机器人滑移率控制系统研究。一方面，依据 μ -s 理论模型来预测滑移率和路面附着系数的关系，建立了路面最优滑移率模型，另一方面，列写永磁同步电机的矢量控制的状态空间方程，在以上两方面的基础上提出基于 NMPC 算法的移动机器人滑移率预测控制系统，并设计目标函数对多目标约束优化问题进行求解，为后续联合仿真和户外实验提供了理论支撑。

第5章 多地形移动机器人滑移率预测控制实验研究

5.1 引言

本章主要通过分别开展仿真研究和户外实物研究,对基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统进行验证,一方面采用 ADAMS-MATLAB/Simulink 搭建联合仿真平台进行仿真实验,验证基于 NMPC 算法的滑移率控制预测系统的有效性。另一方面,开展户外行驶实验,选取四种典型路面,以滑移率优化控制系统开关/闭合作为对比实验,以移动机器人的四轮滑移率、两侧驱动力矩差值作为评价标准来对比移动机器人的运动性能表现,进一步验证仿真实验的优化效果。

5.2 仿真实验研究与分析

5.2.1 多地形移动机器人 ADAMS 虚拟样机搭建

采用三维软件 Solidworks 设计多地形移动机器人三维模型,将其导入 ADAMS 中,搭建虚拟样机模型如图 5-2 所示。

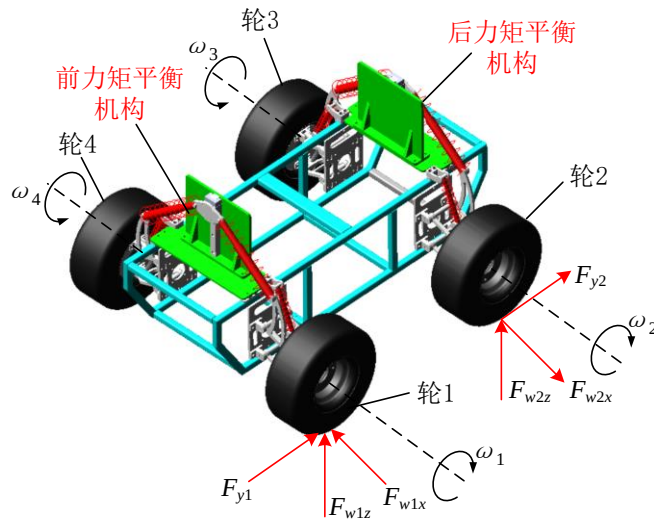


图 5-2 多地形移动机器人 ADAMS 虚拟样机模型

5.2.2 ADAMS-MATLAB/Simulink 联合仿真环境搭建

通过联合仿真实验验证理论建模是动力学研究的常用手段^[74-76],采用 ADAMS-MATLAB/Simulink 联合仿真搭建的仿真系统如图 5-3 所示。

表 5-1 系统仿真基本参数表

参数	数值	参数	数值
车轮刚度 $k_1/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	150.00	车轮阻尼 $c_1/\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	12.00
减振器刚度 $k_2/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	12.00	减振器阻尼 $c_2/\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	0.8 0
车轮质量 m_1/kg	7.00	1/4 车身质量 m_2/kg	20.50
路面摩擦系数 μ	0.60/0.10	车轮滚阻系数 f	0.020
减振器角 α	70°	摆臂角 β	15°
随机路面等级	B	-	-

50

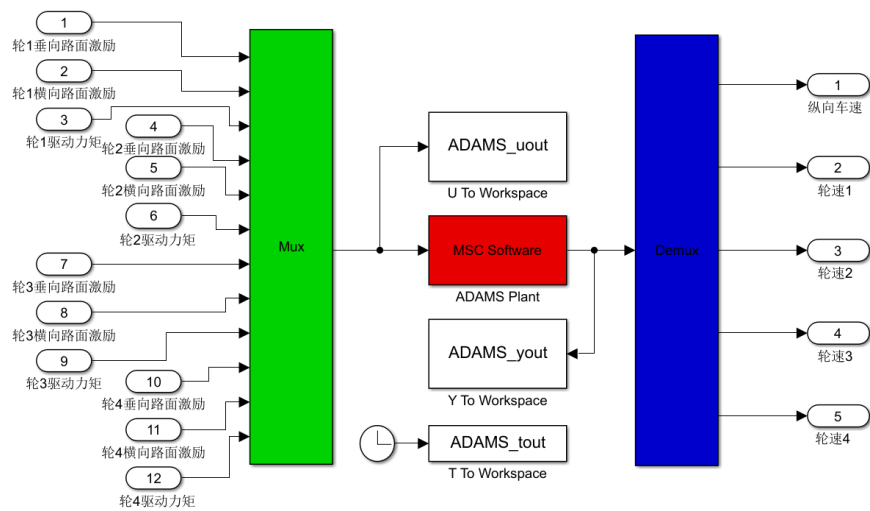


图 5-4 ADAMS_sub 机械系统图

为验证第 4 章提出的基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统的有效性，代入如表 5-1 所示相关仿真参数，进行 B 级随机路面激励行驶仿真运动，主要分析滑移率控制器开启/关闭移动机器人运动性能表征参数(四轮滑移率，四轮驱动力矩，车轮 1/4 以及车轮 2/3 驱动力矩差值)的变化规律

表 5-2 ADAMS_sub 机械系统仿真输入输出表

系统输入	系统输出
四轮路面激励(横向、垂向)	纵向车速
轮 1 驱动力矩	轮速 1
轮 2 驱动力矩	轮速 2
轮 3 驱动力矩	轮速 3
轮 4 驱动力矩	轮速 4

5.2.3 高附着路面和低附着路面仿真实验与分析

为尽可能符合多地形移动机器人实际运动工况，并对比分析滑移率控制系统的优化效果，先开展高附着路面行驶仿真，再进行低附着路面行驶仿真，即路面附着系数 $\mu(\lambda_i)$ 分别取值在高附着路面和低附着路面范围，进行多地形移动机器人的仿真实验。

(1) 高附着路面行驶响应分析

利用在 MATLAB-Simulink 得到的基于滤波白噪声生成的 B 级随机路面谱路面激励位移，与 ADAMS 联合仿真得到高附着路面下多地形移动机器人行驶响应如下所示。

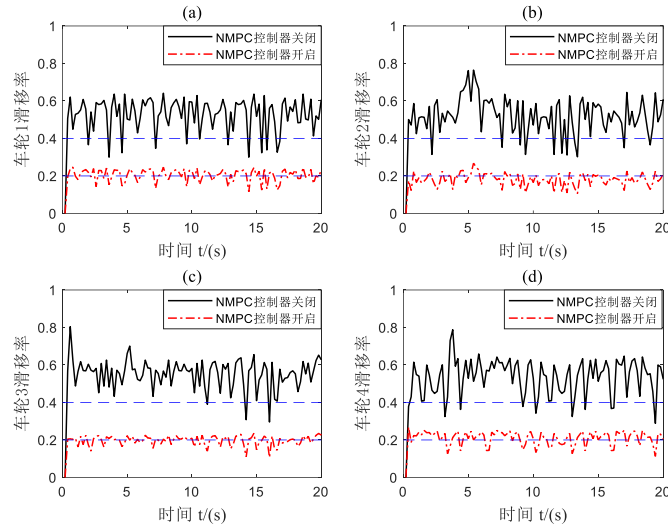


图 5-5 高附着路面车轮滑移率 ADAMS-Simulink 仿真图

图 5-5 中分别为高附着路面工况下，滑移率控制系统处于关闭/开启状态下，多地形移动机器人车轮 1，车轮 2，车轮 3，车轮 4 滑移率大小的仿真实验，对比试验结果如表 5-3 所示。

表 5-3 B 级路面激励高附着路面仿真实验数据分析

参数	无滑移率控制系统	有滑移率控制系统	优化量
车轮 1 滑移率均方根值	0.6244	0.3446	44.82%
车轮 2 滑移率均方根值	0.6418	0.3209	50.00%
车轮 3 滑移率均方根值	0.6168	0.2961	51.99%
车轮 4 滑移率均方根值	0.6203	0.3226	47.99%

通过表 5-3 对比分析得到：针对高附着路面，NMPC 滑移率控制系统开启的情况下，移动机器人四轮滑移率均得到有效抑制，整体处于滑移稳定区间内(0, 0.4)，逼近最优滑移率 0.2，NMPC 滑移率控制系统开启相比关闭的情况下，车轮 1，车轮 2，车轮 3，车轮 4 滑移率优化量依次为：44.82%，50.00%，51.99%，47.99%。

高附着路面下，移动机器人四轮驱动力矩行驶响应如下：

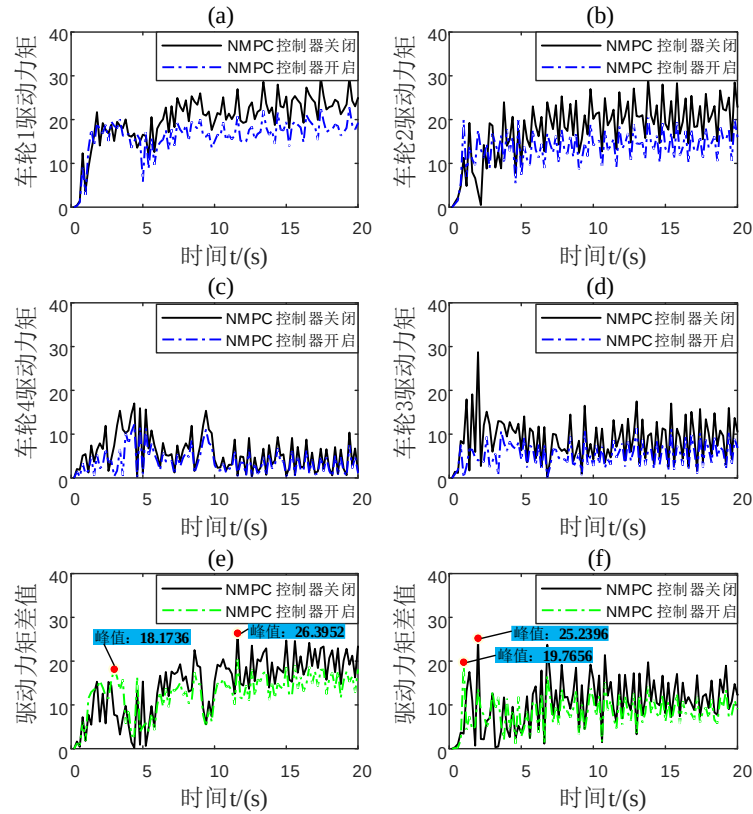


图 5-6 高附着路面车轮驱动力矩 ADAMS-Simulink 仿真图

图 5-6 中分别为高附着路面工况下，滑移率控制系统处于关闭/开启状态下，多地形移动机器人车轮 1，车轮 2，车轮 3，车轮 4 驱动力矩以及车轮 1/4，车轮 2/3 驱动力矩差大小的仿真实验，对比试验结果如表 5-4 所示。

表 5-4 B 级路面激励高附着路面仿真实验数据分析

参数	无滑移率控制系统	有滑移率控制系统	优化量
车轮 1 驱动力矩均方根值	22.7087	21.4572	-
车轮 2 驱动力矩均方根值	21.1987	17.8391	-
车轮 3 驱动力矩均方根值	19.7145	18.7201	-
车轮 4 驱动力矩均方根值	20.9838	21.1895	-
驱动力矩差均方根值(轮 1/4)	7.9845	1.2677	36.12%
驱动力矩差均方根值(轮 2/3)	1.4842	0.8881	40.16%

通过表 5-4 对比分析得到：针对高附着路面，NMPC 滑移率控制系统开启相比关闭的情况下，单个车轮驱动力矩峰值得到抑制，车轮 1/4，车轮 2/3 驱动力矩差值峰值明显降低，且驱动力矩差值均方根值优化量分别为：36.12%，40.16%，

降低了车轮打滑的几率，综上，仿真结果验证了基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统对于抑制高附着路面下的车轮滑移率，减小两侧车轮力矩差的有效性。

(2) 低附着路面行驶响应分析

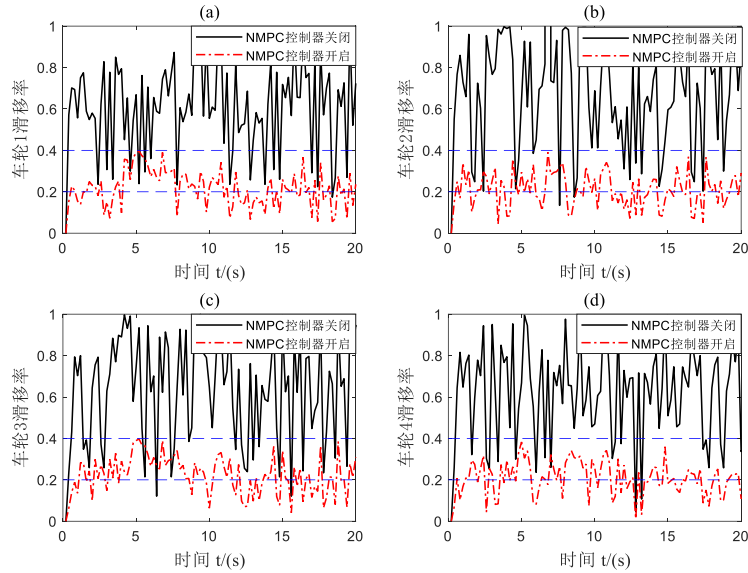


图 5-7 低附着路面车轮驱动力矩 ADAMS-Simulink 仿真图

图 5-7 中分别为低附着路面工况下，滑移率控制系统处于关闭/开启状态下，多地形移动机器人车轮 1，车轮 2，车轮 3，车轮 4 滑移率大小的仿真实验，对比试验结果如表 5-5 所示。

表 5-5 B 级路面激励低附着路面仿真实验数据分析

参数	无滑移率控制系统	有滑移率控制系统	优化量
车轮 1 滑移率均方根值	0.7780	0.2510	67.38%
车轮 2 滑移率均方根值	0.7871	0.2548	67.63%
车轮 3 滑移率均方根值	0.7785	0.2524	67.34%
车轮 4 滑移率均方根值	0.7767	0.2522	67.52%

通过表 5-5 对比分析得到：针对低附着路面，NMPC 滑移率控制系统开启的情况下，移动机器人四轮滑移率均得到有效抑制，整体处于滑移稳定区间内(0, 0.4)，逼近最优滑移率 0.2，NMPC 滑移率控制系统开启相比关闭的情况下，车轮 1，车轮 2，车轮 3，车轮 4 滑移率优化量依次为：67.38%，67.63%，67.34%，67.52%；

低附着路面下，移动机器人四轮驱动力矩行驶响应如下：

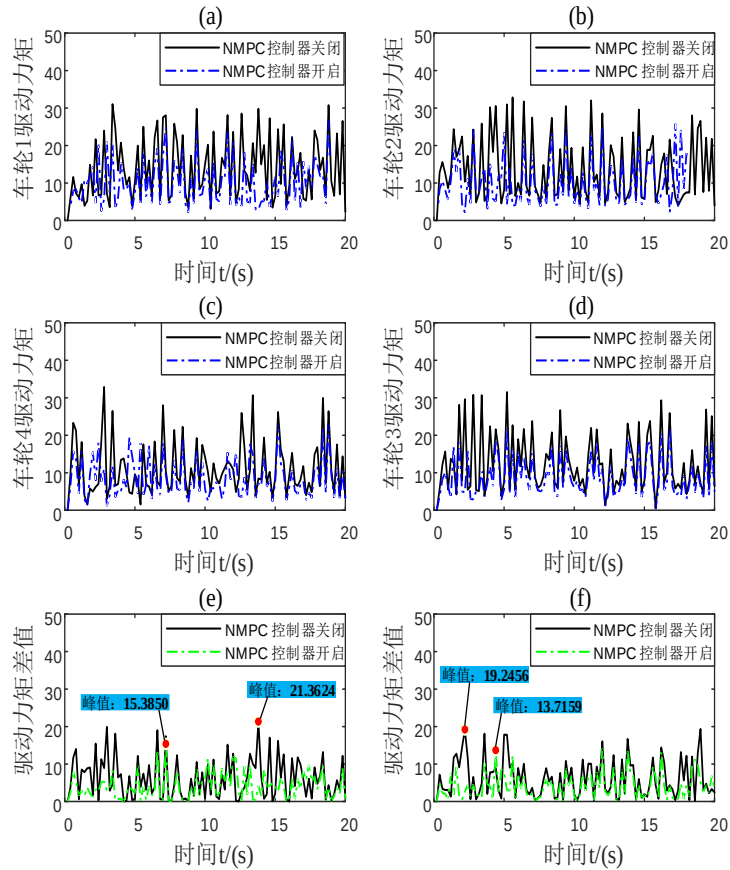


图 5-8 低附着路面车轮驱动力矩 ADAMS-Simulink 仿真图

图 5-8 中分别为低附着路面工况下，滑移率控制系统处于关闭/开启状态下，多地形移动机器人车轮 1，车轮 2，车轮 3，车轮 4 驱动力矩以及车轮 1/4，车轮 2/3 驱动力矩差大小的仿真实验，对比试验结果如表 5-6 所示。

表 5-6 B 级路面激励低附着路面仿真实验数据分析

参数	无滑移率控制系统	有滑移率控制系统	优化量
车轮 1 驱动力矩均方根值	14.0008	10.2869	-
车轮 2 驱动力矩均方根值	23.9978	17.6797	-
车轮 3 驱动力矩均方根值	20.3443	15.1539	-
车轮 4 驱动力矩均方根值	15.7620	14.7108	-
驱动力矩差均方根值(轮 1/4)	1.7459	1.4239	18.44%
驱动力矩差均方根值(轮 2/3)	3.6535	2.9689	18.73%

通过表 5-6 对比分析得到：针对低附着路面，NMPC 滑移率控制系统开启相比关闭的情况下，单个车轮驱动力矩峰值得到抑制，车轮 1/4，车轮 2/3 驱动力矩差值峰值明显降低，且驱动力矩差值均方根值优化量分别为：18.44%，18.73%，降低了车轮打滑的几率，综上，仿真结果验证了基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统对于抑制低附着路面下的车轮滑移率，减小两侧车轮力矩差的有效性。

5.3 户外多地形行驶实验研究与分析

5.3.1 户外多地形行驶实验方案设计与平台搭建

为进一步验证基于 NMPC 算法的滑移率控制系统的有效性和优化效果，开展户外多路面行走实验，实验方案与流程设计如图 5-9 所示。在校区内选取四种路面分别作为户外实验路面的典型代表，其中选取柏油路面和土壤路面代表高附着路面，选取鹅卵石路面和草地路面作为低附着的路面代表。通过 ST-LINKV2 下载器将多地形移动机器人的底层运动控制代码下载到 STM32F407 的主控制器中，同一种路面，进行两组对比实验，一组实验将移动机器人的底层运动代码中 NMPC 算法模块注释，即关闭状态；另一组实验将 NMPC 模块激活，即开启状态，同一组路面的实验统一驱动轮的初始转速，并且保证两组对比实验的行驶路径基本相同。

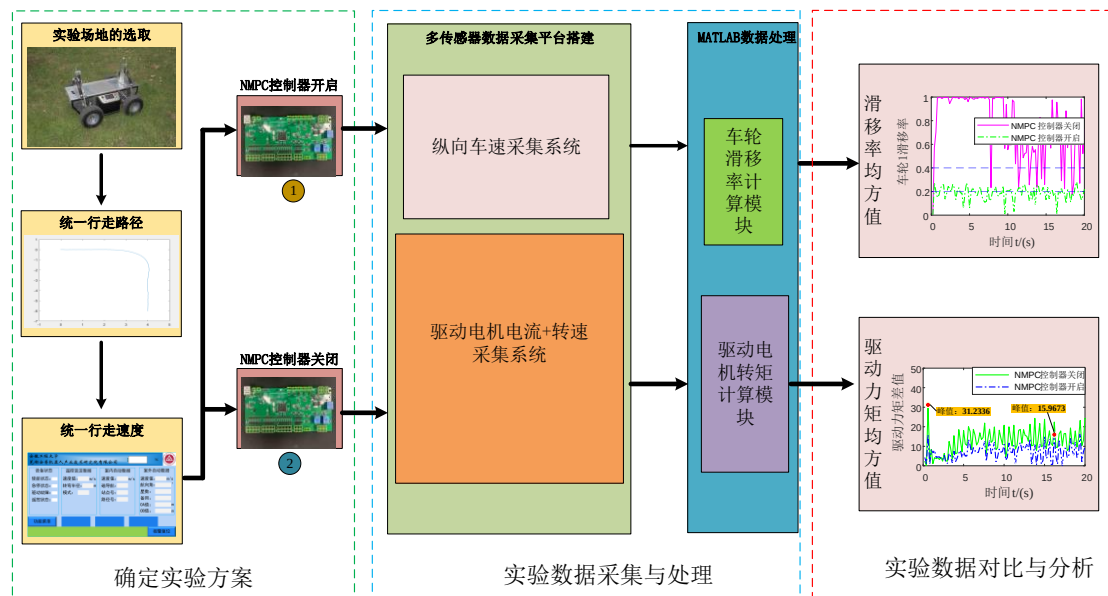


图 5-9 多地形移移动机器人户外行走实验流程

如图 5-10 所示为移动机器人纵向车速采集系统，WTRTK-4GR 定位移动站固定在移动机器人上，由移动机器人内部 DC48V 锂电池通过稳压模块转 DC24V 供电，输出数据通过串口无线通信模块直接发送到 PC 端上位机 WiTion 中，通过上位机 WiTion 采集不同路面激励下的多地形移动机器人的纵向车速，单位 Km/h。

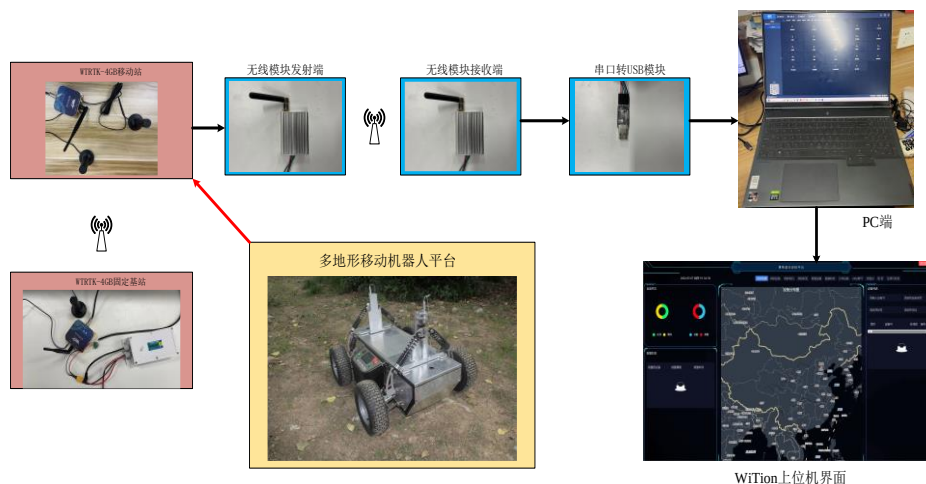


图 5-10 多地形移动机器人纵向车速采集系统

如图 5-11 所示为移动机器人驱动电机力矩、转速采集系统，通过 STM32F407 主控制器采集不同路面激励下行驶的移动机器人的四个驱动电机的电机电流和电机编码器，其采集方式可由内部 CANope 协议通过发送读取转速指令直接读取电机实时转速，读取的转速值为脉冲数，单位 counts，通过乘以相应的比例系数，将其单位换算为(rpm)/(r/min)。

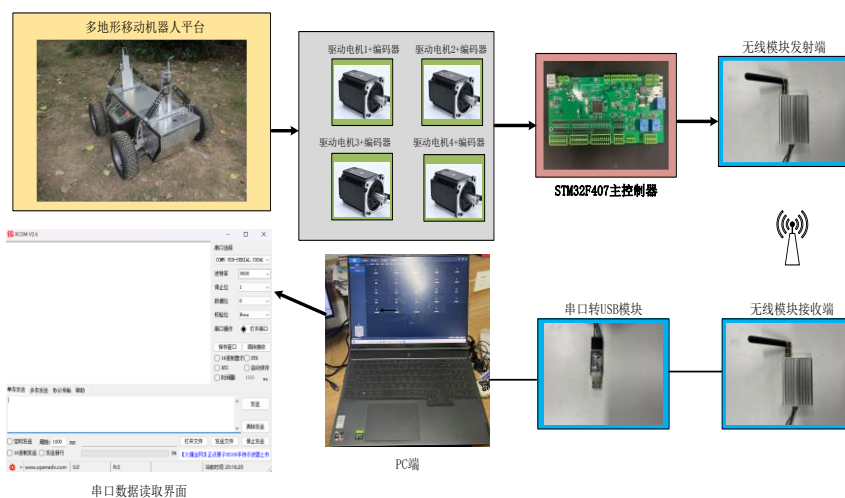


图 5-11 多地形移动机器人驱动力矩、电机转速采集系统

四种典型路面如图 5-12 所示，分别作为户外实验路面的典型代表，其中选取柏油路面和土壤路面代表高附着路面，选取鹅卵石路面和草地路面作为低附着的路面代表。



(a) 柏油路面



(b) 土壤路面



(c) 鹅卵石路面



(d) 草地路面

图 5-12 四种典型路面

户外行走实验主要为四种路面统一轮速，统一路径的行驶实验，其中四种路面分别为高附着路面的柏油路面和土壤路面，低附着路面的鹅卵石路面和草地路面，分别采集同一种路面 NMPC 控制器关闭/开启前后多地形移动机器人运动性能动态参数的数据，并通过 MATLAB 进行实验数据分析，下面为四种路面的实验数据对比分析。

5.3.2 高附着路面实验结果分析

(1) 柏油路面实验数据分析

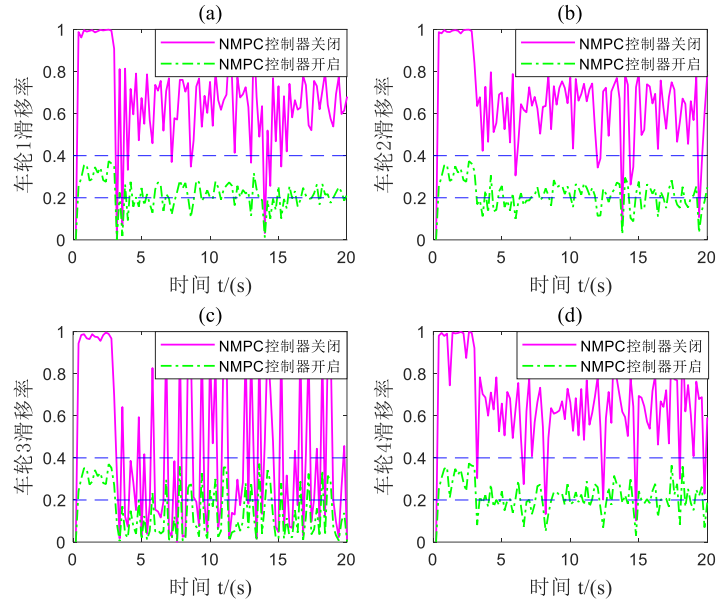


图 5-13 柏油路面多地形移动机器人滑移率实验对比图

图 5-13 中分别为柏油路面工况下，滑移率控制系统处于关闭/开启状态下，多地形移动机器人车轮 1，车轮 2，车轮 3，车轮 4 滑移率大小的实验对比图，对比实验结果如表 5-7 所示。

表 5-7 柏油路面车轮滑移率数据分析表

参数	无滑移率控制系统	有滑移率控制系统	优化量
车轮 1 滑移率均方根值	0.7243	0.3211	55.67%
车轮 2 滑移率均方根值	0.6841	0.2913	57.41%
车轮 3 滑移率均方根值	0.7144	0.3577	49.93%
车轮 4 滑移率均方根值	0.8203	0.3625	55.81%

通过表 5-7 对比分析得到：针对柏油路面，NMPC 滑移率控制系统开启的情况下，移动机器人四轮滑移率均得到有效抑制，整体处于滑移稳定区间内(0, 0.4)，逼近最优滑移率 0.2，NMPC 滑移率控制器开启相比与关闭的情况下，车轮 1，车轮 2，车轮 3，车轮 4 滑移率优化量依次为：55.67%，57.41%，49.93%，55.81%。

柏油路面下，移动机器人四轮驱动力矩行驶响应如下：

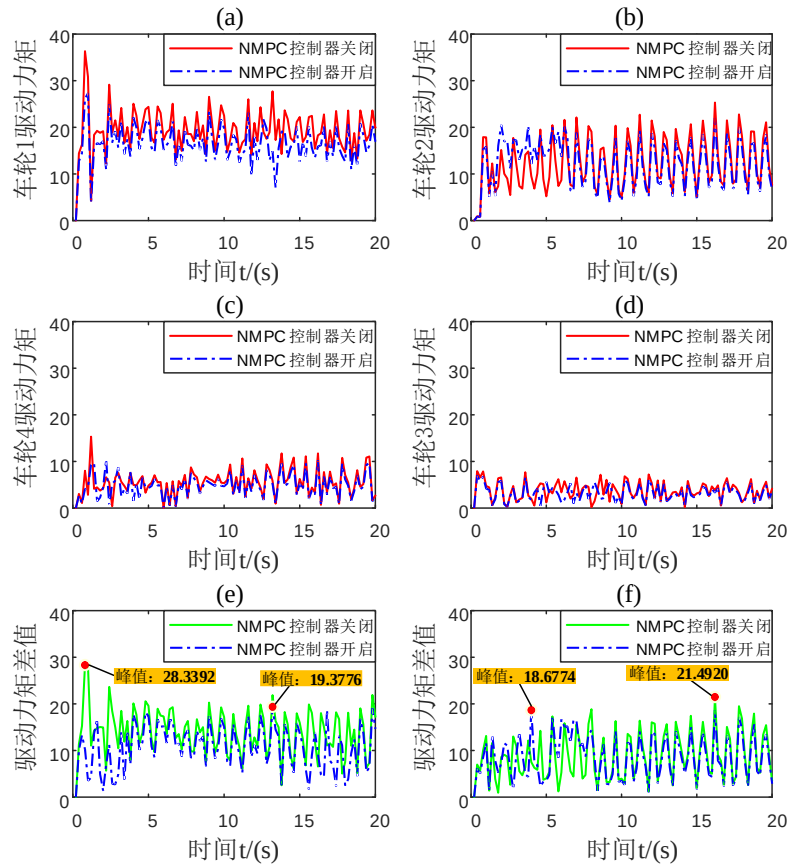


图 5-14 柏油路面多地形移动机器人驱动力矩实验对比图

图 5-14 中分别为柏油路面工况下，滑移率控制系统处于关闭/开启状态下，多地形移动机器人车轮 1，车轮 2，车轮 3，车轮 4 驱动力矩以及车轮 1/4，车轮 2/3 驱动力矩差大小的实验对比图，对比实验结果如表 5-8 所示。

表 5-8 柏油路面车轮驱动力矩数据分析表

参数	无滑移率控制系统	有滑移率控制系统	优化量
车轮 1 驱动力矩均方根值	12.6673	7.4572	-
车轮 2 驱动力矩均方根值	23.5477	16.5245	-
车轮 3 驱动力矩均方根值	20.7145	18.2541	-
车轮 4 驱动力矩均方根值	9.5235	5.7575	-
驱动力矩差均方根值(轮 1/4)	3.1323	1.6997	45.73%
驱动力矩差均方根值(轮 2/3)	2.8332	1.7296	39.95%

通过表 5-8 对比分析得到：针对柏油路面，NMPC 滑移率控制系统开启相比与关闭的情况下，单个车轮驱动力矩峰值得到抑制，车轮 1/4，车轮 2/3 驱动力矩差值峰值明显降低，且驱动力矩差值均方根值优化量分别为：45.73%，39.95%，

降低了车轮打滑的几率，综上，实验结果验证了基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统对于抑制柏油路面下的车轮滑移率，减小两侧车轮力矩差的有效性。

(2) 土壤路面实验数据分析

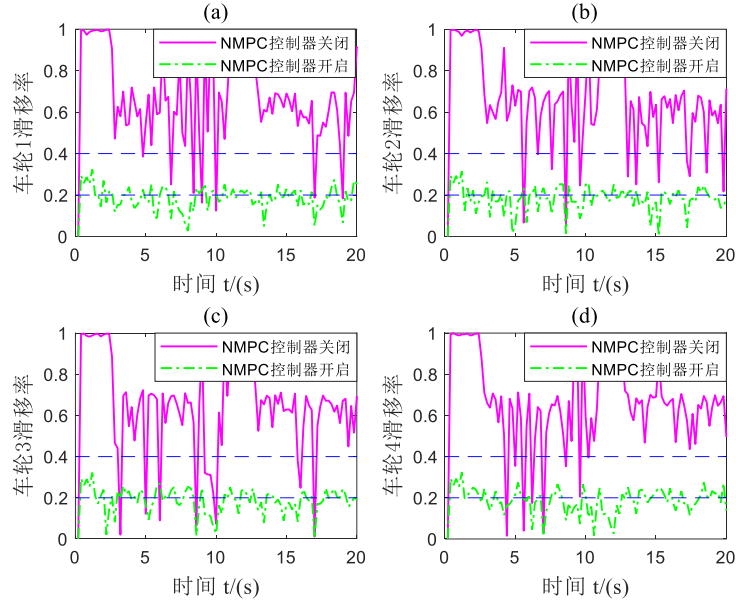


图 5-15 土壤路面多地形移动机器人滑移率实验对比图

图 5-15 中分别为土壤路面工况下，滑移率控制系统处于关闭/开启状态下，多地形移动机器人车轮 1，车轮 2，车轮 3，车轮 4 滑移率大小的实验对比图，对比实验结果如表 5-4 所示。

表 5-9 土壤路面车轮滑移率数据分析表

参数	无滑移率控制系统	有滑移率控制系统	优化量
车轮 1 滑移率均方根值	0.7452	0.3546	49.73%
车轮 2 滑移率均方根值	0.6854	0.2709	58.62%
车轮 3 滑移率均方根值	0.6727	0.2580	61.65%
车轮 4 滑移率均方根值	0.7833	0.3486	55.50%

通过表 5-9 对比分析得到：针对土壤路面，NMPC 滑移率控制器开启的情况下，移动机器人四轮滑移率均得到有效抑制，整体处于滑移稳定区间内(0, 0.4)，逼近最优滑移率 0.2，NMPC 滑移率控制系统开启相比关闭的情况下，车轮 1，车轮 2，车轮 3，车轮 4 滑移率优化量依次为：49.73%，58.62%，61.65%，55.50%。

土壤路面下，移动机器人四轮驱动力矩行驶响应如下：

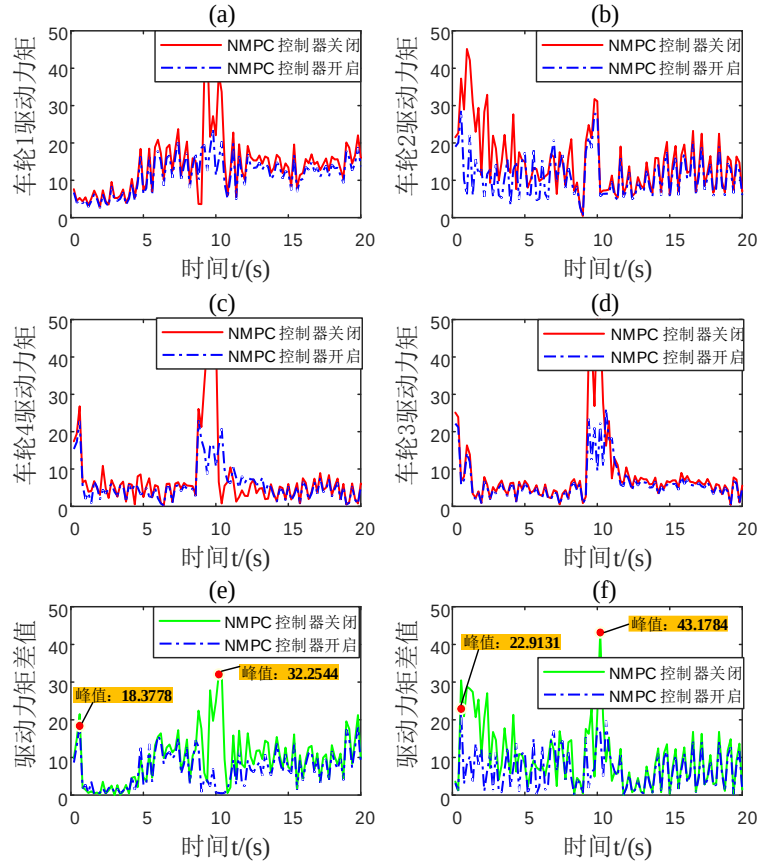


图 5-16 土壤路面多地形移动机器人驱动力矩实验对比图

图 5-16 中分别为土壤附着路面工况下，滑移率控制系统处于关闭/开启状态下，多地形移动机器人车轮 1，车轮 2，车轮 3，车轮 4 驱动力矩以及车轮 1/4，车轮 2/3 驱动力矩差大小的实验对比图，对比实验结果如表 5-10 所示。

表 5-10 土壤路面车轮驱动力矩数据分析表

参数	无滑移率控制系统	有滑移率控制系统	优化量
车轮 1 驱动力矩均方根值	20.5642	17.5620	-
车轮 2 驱动力矩均方根值	16.8524	15.4257	-
车轮 3 驱动力矩均方根值	19.2525	17.2422	-
车轮 4 驱动力矩均方根值	18.2574	16.3583	-
驱动力矩差均方根值(轮 1/4)	2.3068	1.2037	47.81%
驱动力矩差均方根值(轮 2/3)	2.4001	1.8165	24.32%

通过表 5-10 对比分析得到：针对土壤路面，NMPC 滑移率控制系统开启相比关闭的情况下，单个车轮驱动力矩峰值得到抑制，车轮 1/4，车轮 2/3 驱动力矩差值峰值明显降低，且驱动力矩差值均方根值优化量分别为：47.81%，24.32%，

降低了车轮打滑的几率，综上，实验结果验证了基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统对于抑制土壤路面下的车轮滑移率，减小两侧车轮力矩差的有效性。

5.3.3 低附着路面实验结果分析

(1) 鹅卵石路面实验数据分析

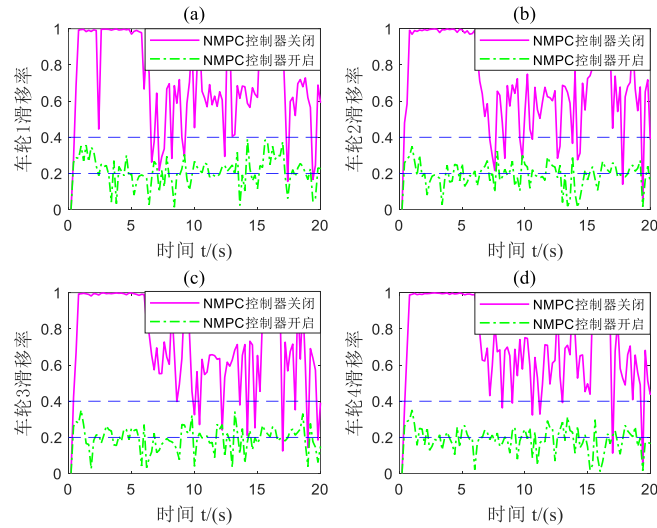


图 5-17 鹅卵石路面多地形移动机器人滑移率实验对比图

图 5-17 中分别为鹅卵石路面工况下，滑移率控制系统处于关闭/开启状态下，多地形移动机器人车轮 1，车轮 2，车轮 3，车轮 4 滑移率大小的实验对比图，对比实验结果如表 5-11 所示。

表 5-11 鹅卵石路面车轮滑移率数据分析表

参数	无滑移率控制系统	有滑移率控制系统	优化量
车轮 1 滑移率均方根值	0.7278	0.3204	55.98%
车轮 2 滑移率均方根值	0.6842	0.2973	56.54%
车轮 3 滑移率均方根值	0.6652	0.2758	58.54%
车轮 4 滑移率均方根值	0.6772	0.3247	52.05%

通过表 5-11 对比分析得到：针对鹅卵石路面，NMPC 滑移率控制系统开启的情况下，移动机器人四轮滑移率均得到有效抑制，整体处于滑移稳定区间内(0, 0.4)，逼近最优滑移率 0.2，NMPC 滑移率控制系统开启相比关闭的情况下，车轮

1, 车轮 2, 车轮 3, 车轮 4 滑移率优化量依次为: 55..98%, 56.54%, 58.54%, 52.05%;

鹅卵石路面下, 移动机器人四轮驱动力矩行驶响应如下:

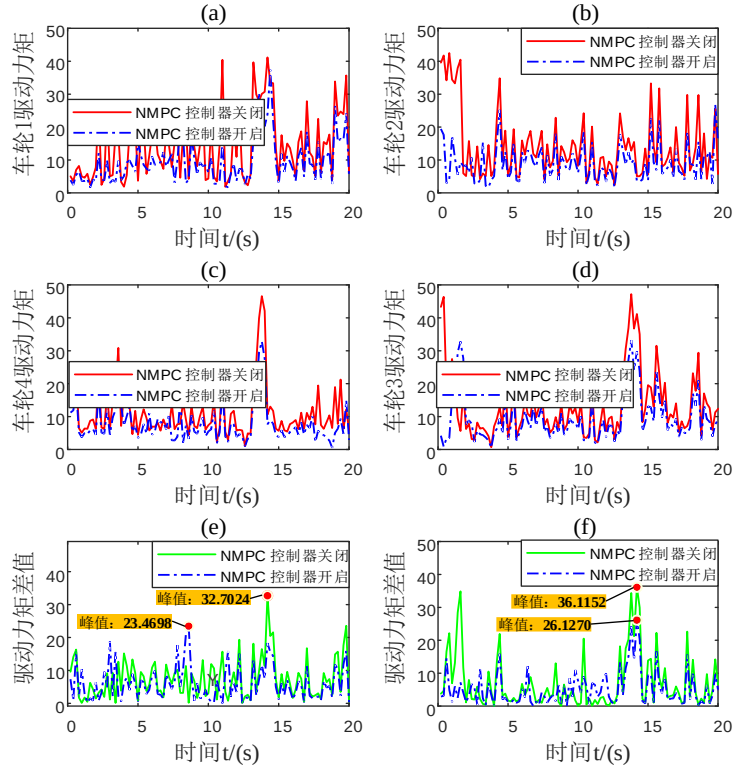


图 5-18 鹅卵石路面多地形移动机器人驱动力矩实验对比图

图 5-18 中分别为鹅卵石路面工况下, 滑移率控制系统处于关闭/开启状态下, 多地形移动机器人车轮 1, 车轮 2, 车轮 3, 车轮 4 驱动力矩以及车轮 1/4, 车轮 2/3 驱动力矩差大小的实验对比图, 对比实验结果如表 5-3 所示。

表 5-12 鹅卵石路面车轮驱动力矩数据分析表

参数	无滑移率控制系统	有滑移率控制系统	优化量
车轮 1 驱动力矩均方根值	11.2543	10.4562	-
车轮 2 驱动力矩均方根值	25.2548	21.5876	-
车轮 3 驱动力矩均方根值	22.4552	19.2475	-
车轮 4 驱动力矩均方根值	13.2575	12.2578	-
驱动力矩差均方根值(轮 1/4)	2.0032	1.8016	10.08%
驱动力矩差均方根值(轮 2/3)	2.7996	2.3401	16.41%

通过表 5-12 对比分析得到：针对鹅卵石路面，NMPC 滑移率控制系统开启相比关闭的情况下，单个车轮驱动力矩峰值得到抑制，车轮 1/4，车轮 2/3 驱动力矩差值峰值明显降低，且驱动力矩差值均方根值优化量分别为：10.08%，16.41%，降低了车轮打滑的几率，综上，实验结果验证了基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统对于抑制鹅卵石路面下的车轮滑移率，减小两侧车轮力矩差的有效性。

(2)草地路面实验数据分析

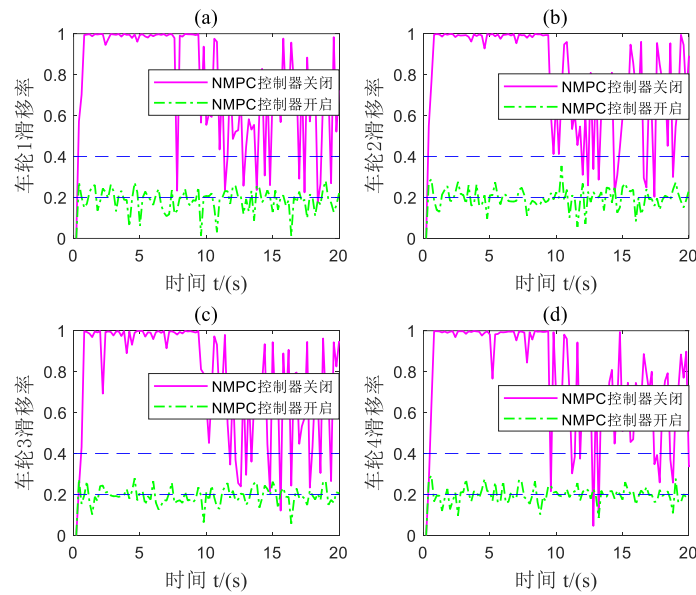


图 5-19 草地路面多地形移动机器人滑移率实验对比图

图 5-19 中分别为草地路面工况下，滑移率控制系统处于关闭/开启状态下，多地形移动机器人车轮 1，车轮 2，车轮 3，车轮 4 滑移率大小的实验对比图，对比实验结果如表 5-13 所示。

表 5-13 草地路面车轮滑移率数据分析表

参数	无滑移率控制系统	有滑移率控制系统	优化量
车轮 1 滑移率均方根值	0.7545	0.3855	48.91%
车轮 2 滑移率均方根值	0.7587	0.3756	50.49%
车轮 3 滑移率均方根值	0.7025	0.3167	54.92%
车轮 4 滑移率均方根值	0.7486	0.3015	59.72%

通过表 5-13 对比分析得到：针对草地路面，NMPC 滑移率控制系统开启的情况下，移动机器人四轮滑移率均得到有效抑制，整体处于滑移稳定区间内(0, 0.4)，

逼近最优滑移率 0.2，NMPC 滑移率控制器开启相比与关闭的情况下，车轮 1，车轮 2，车轮 3，车轮 4 滑移率优化量依次为：48.91%，50.49%，54.92%，59.72%；草地路面下，移动机器人四轮驱动力矩行驶响应如下：

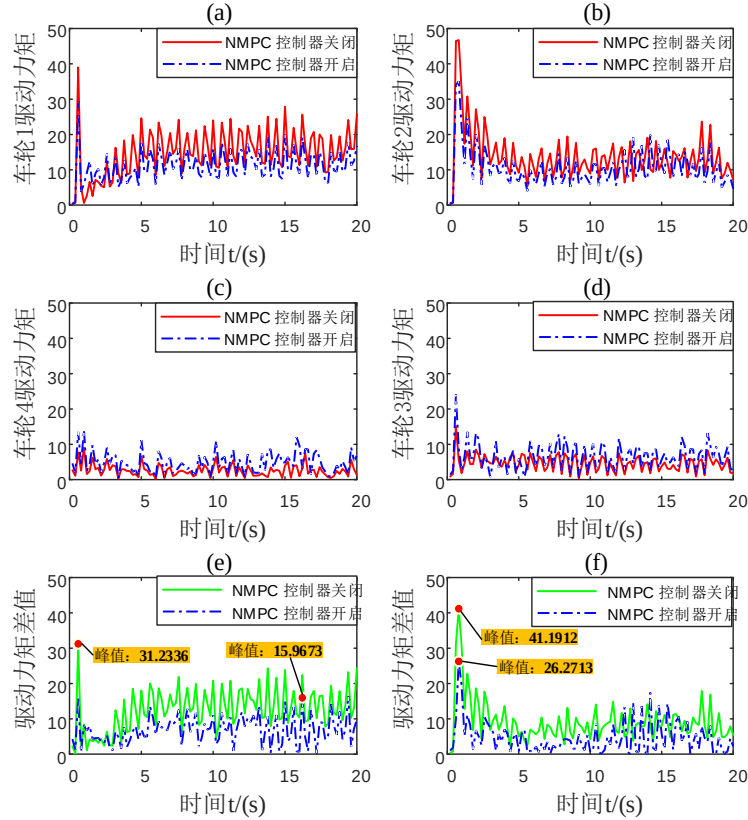


图 5-20 草地路面多地形移动机器人滑移率实验对比图

图 5-20 分别为草地路面工况下，滑移率控制系统处于关闭/开启状态下，多地形移动机器人车轮 1，车轮 2，车轮 3，车轮 4 驱动力矩以及车轮 1/4，车轮 2/3 驱动力矩差大小的实验对比图，对比实验结果如表 5-14 所示。

表 5-14 草地路面车轮驱动力矩数据分析表

参数	无滑移率控制系统	有滑移率控制系统	优化量
车轮 1 驱动力矩均方根值	10.9683	8.4572	-
车轮 2 驱动力矩均方根值	20.2458	19.7582	-
车轮 3 驱动力矩均方根值	18.2578	18.5782	-
车轮 4 驱动力矩均方根值	13.2875	10.5282	-
驱动力矩差均方根值(轮 1/4)	2.3192	2.0710	10.70%
驱动力矩差均方根值(轮 2/3)	1.9880	1.1800	40.64%

通过表 5-14 对比分析得到：针对草地路面，NMPC 滑移率控制系统开启相比关闭的情况下，单个车轮驱动力矩峰值得到抑制，车轮 1/4，车轮 2/3 驱动力矩差值峰值明显降低，且驱动力矩差值均方根值优化量分别为：10.70%，40.64%，降低了车轮打滑的几率，综上，实验结果验证了基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统对于抑制草地路面下的车轮滑移率，减小两侧车轮力矩差的有效性。

5.4 本章小结

为了验证基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统的有效性以及对多地形移动机器人车轮滑移率的抑制效果，本章分别开展了 ADAMS-MATLAB/Simulink 联合仿真研究和户外实物研究，一方面，以车轮滑移率和两侧驱动力矩差值仿真结果验证了基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统的有效性，另一方面，通过 NMPC 滑移率控制系统关闭/开启，统一初始车轮转速、行走路径的户外行驶实验，分别采集移动机器人纵向速度、四轮转速以及驱动电流，经过数据处理后的实验结果验证了基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统的有效性，为多地形移动机器人在随机路面的滑移率抑制，增强牵引力转换效果，提高移动移动机器人运动性能奠定了较好的基础。

第 6 章 总结与展望

6.1 论文总结

随着移动机器人户外作业精度要求的提高,多地形移动机器人面对复杂环境的可靠性和运动性能变得至关重要,针对动态路面激励下多地形移动机器人车轮过度滑移的问题,提出了一种基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统,并通过仿真实验和户外实物实验验证了其有效性。主要取得成果如下:

(1) 基于移动机器人滑移机理分析,建立地面-移动机器人-车轮综合动态模型。

分析多地形移动机器人机械结构的设计思路和基本参数,引入随机路面激励和摩擦模型并运用移动机器人动力学原理,阐明了移动机器人的滑移机理,设计了移动机器人底层运动控制系统,在此基础上,建立了路面激励模型和移动机器人及车轮运动动力学综合动态模型,量化了路面激励对移动机器人滑移率的影响。

(2) 基于移动机器人综合动态模型,提出一种基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统。

依据多地形移动机器人的滑移机理建立了路面最优滑移率预测模型,建立了驱动电机控制模型,在此基础上,结合提出的基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统,设计目标函数求解多目标约束优化控制问题。分别开展了 ADAMS-MTALAB/Simulink 联合仿真实验和户外四种典型路面实物实验,结果验证了基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统的有效性,抑制了动态路面激励下的车轮滑移率,增强了移动机器人牵引力的转化效果,提高了移动机器人的运动性能。

6.2 研究展望

多地形移动机器人作为集环境感知、自主推理、环境建模、复杂任务规划及决策为一体的通用智能移动平台,在恶劣的工作场景种依旧有着极强的野外作业能力。论文主要基于地面-移动机器人-车轮综合动态模型,提出一种基于 NMPC 算法的滑移率预测控制系统,虽然取得了一定的成果,但是由于实验设备数量的限制以及实验场地种类的局限性等问题,在以下 2 个方面仍需要做进一步的研究和改善:

(1) 复杂地面力学解析研究。论文关于路面建模研究采用路面激励来表达,后期可以采用更为精确的移动机器人与地面相互作用力学模型,分析不同工况下的力学模型,使得综合动态模型更加精确,进一步提高算法的控制精度。

(2) 路面最优滑移率辨识研究。论文关于路面最优滑移率的研究采用的是基于模型的方法,即依赖于滑移率和路面附着系数之间的关系,由于移动机器人的实际行驶工况复杂多变,影响滑移率计算精度的因素众多,因此如何更好的抵抗外界不确定因素的干扰是后续研究的关键。

参考文献

- [1] 杜建诚, 李茹芸, 张韩. 平板遥控监控拍照四足机器人的设计 [J]. 物联网技术, 2023, 13(6): 125-127.
- [2] 高栋兴. 智能机器人在抢险救灾中的应用分析 [J]. 水利水电技术(中英文), 2022, (S1):053.
- [3] 梁艺, 王伟振, 汪步云. 全向移动光伏清扫机器人清扫特性分析与优化 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 32-38.
- [4] 王康, 袁宝峰, 朱建中. 高性能星球车车轮研究进展 [J]. 载人航天, 2022,(003):028.
- [5] 程捷, 郭振武, 周坤. 基于改进相关性扫描匹配的室内大场景下移动机器人的全局定位方法 [J]. 机器人, 2023, 45(5): 581-590.
- [6] 梁军, 韩冬冬, 盘朝奉. 基于移动机器人的智能车库关键技术综述 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(3): 1-20.
- [7] 彭湘, 向凤红, 毛剑琳. 多地形约束条件下的移动机器人路径规划方法 [J]. 小型微型计算机系统, 2021, 42(09): 1900-1905.
- [8] 苏波, 江磊, 刘宇飞. 移动机器人跨域跃质关键技术综述 [J]. 兵工学报, 2023, 44(09): 2556-2567.
- [9] 吴爽, 张扬眉. 国外地外天体漫游车发展状况研究 [J]. 国际太空, 2012, (08): 2-14.
- [10] Ma Z, Li D. Suspension system design of all-terrain fire-fighting robot[C]. 2018 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS).IEEE, 2018: 466-468.
- [11] 张春燕, 江毅文, 杨杰. 可变向多地形移动全 R 副并联机器人 [J]. 工程设计学报: 1-11.
- [12] 何妍颖, 李晔卓, 武建昀. 多模式两轮移动机器人的设计与运动分析 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(23): 83-92.
- [13] 孙海燕, 宗成国. 可变形履带式移动机器人设计分析 [J]. 电子质量, 2023, (05): 40-43.
- [14] Aguirre-Anaya J A, Gutierrez-Frias O, Sossa-Azuela H. Optimization of a passive parallelogram suspension system for a planetary rover using differential evolution [J]. IEEE Latin America Transactions, 2021, 19(8): 1366-1374.
- [15] Lindemann R A, Voorhees C J. Mars Exploration Rover mobility assembly design, test and performance[C] 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE, 2005, 1:450-455.
- [16] Bayar G, Koku A B, ilhan Konukseven E. Design of a configurable all terrain mobile robot platform [J]. Dimensions, 2009, 2000(225x400x): 225x400x.
- [17] Lauria M, Nadeau I, Lepage P, et al. Design and control of a four steered wheeled mobile robot[C]. IECON 2006-32nd annual conference on IEEE industrial electronics. IEEE, 2006: 4020-4025.
- [18] 尚哲, 王挺, 徐瑶. 六轮摇臂移动机器人结构设计与越障动力学研究 [J]. 兵工学报, 2023, 44(11): 3478-3488.
- [19] 王红梅, 张明路, 张小俊. 新型八轮腿复合移动机器人动力学分析与控制 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(23): 2858-2863.

-
- [20] Yu M, Arana C, Evangelou S A, et al. Quarter-car experimental study for series active variable geometry suspension[J]. IEEE transactions on control systems technology, 2017, 27(2): 743-759.
- [21] Angeles J. An innovative drive for wheeled mobile robots[J]. IEEE ASME Transactions on Mechatronics, 2005, 10(1): 43-49.
- [22] Foglia M, Reina G. Locomotion performance evaluation of an all-terrain rover [J]. International Journal of Mechanics and Control, 2008, 9(2): 13-25.
- [23] Schäfer B, Gibbesch A, Krenn R, et al. Planetary rover mobility simulation on soft and uneven terrain[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(1): 149-169.
- [24] Li Z, Jing X, Sun B, et al. Autonomous navigation of a tracked mobile robot with novel passive bio-inspired suspension[J]. IEEE ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(6): 2633-2644.
- [25] Iagnemma K, Rzepniewski A, Dubowsky S, et al. Control of robotic vehicles with actively articulated suspensions in rough terrain[J]. Autonomous Robots, 2003, 14: 5-16.
- [26] Edwin L E, Denhart J D, Gemmer T R, et al. Performance analysis and technical feasibility assessment of a transforming roving-rolling explorer rover for Mars exploration[J]. Journal of Mechanical Design, 2014, 136(7): 071010.
- [27] Tătar M O, Popovici C, Mândru D, et al. Design and development of an autonomous omni-directional mobile robot with Mecanum wheels[C]. 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. IEEE, 2014: 1-6.
- [28] 张鲁浩, 贾茜, 张四弟. 全方位移动机器人控制系统设计 [J]. 制造业自动化, 2019, 41(02): 35-38.
- [29] 姜海红, 孙丽丽, 黄庭培. 基于数据驱动的轮式移动机器人控制 [J]. 控制工程, 2020, 27(03): 572-576.
- [30] 刘逢刚, 丁磊, 肖利. 基于预测算法的遥控机器人控制系统 [J]. 红外与激光工程, 2021, 50(S2): 122-130.
- [31] 陈奕梅, 康雪晶, 徐鹏. 复杂环境下多移动机器人控制算法研究 [J]. 电光与控制, 2021, 28(04): 48-52.
- [32] Xu T, Wu Y, Fang H, et al. Adaptive finite-time tracking control for full state constrained nonlinear systems with time-varying delays and input saturation[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2022, 44(9): 1824-1835.
- [33] Li J, Wang J, Peng H, et al. Neural fuzzy approximation enhanced autonomous tracking control of the wheel-legged robot under uncertain physical interaction[J]. Neurocomputing, 2020, 410: 342-353.
- [34] Li P, Liu D, Baldi S. Adaptive integral sliding mode control in the presence of state-dependent uncertainty[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(5): 3885-3895.
- [35] Peng G, Chen C L P, Yang C. Robust admittance control of optimized robot-environment interaction using reference adaptation[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2022.
- [36] Zhu C, Jiang Y, Yang C. Fixed-time neural control of robot manipulator with global stability and guaranteed transient performance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70(1): 803-812.

- [37] Huang H, Yang C, Chen C L P. Optimal robot–environment interaction under broad fuzzy neural adaptive control[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 51(7): 3824-3835.
- [38] Liu Y, Bai K, Wang H, et al. Autonomous Planning and Robust Control for Wheeled Mobile Robot With Slippage Disturbances Based on Differential Flat[J]. IET Control Theory & Applications, 2023, 17(16): 2136-2145.
- [39] 熊蓉, 张翮, 褚健. 四轮全方位移动机器人的建模和最优控制 [J]. 控制理论与应用, 2006, (01): 93-98.
- [40] 赵磊, 王鸿鹏, 董良. 一种基于动力学模型的高速轮式移动机器人漂移运动控制方法 [J]. 机器人, 2014, 36(02): 137-146.
- [41] Sun Z, Hu S, Xie H, et al. Fuzzy adaptive recursive terminal sliding mode control for an agricultural omnidirectional mobile robot[J]. Computers and Electrical Engineering, 2023, 105: 108529.
- [42] Hang D T, Tien N M, Do Quang H, et al. Dynamic Surface Control Tracking Algorithm for Four-wheel Differential Drive Mobile Robot[C]//2023 12th International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS). IEEE, 2023: 5-10..
- [43] Li W, Ding L, Liu Z, et al. Kinematic bilateral teledriving of wheeled mobile robots coupled with slippage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(3): 2147-2157.
- [44] 叶玉博, 魏超, 刘雨昂. 分布式电驱动无人平台车轮滑移率最优控制 [J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(11): 1144-1148.
- [45] 李全通, 王翔宇, 张邦基. 颠簸路面下轮胎纵-垂向耦合状态观测及其滑移率控制研究 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 62-73.
- [46] 方浩, 窦丽华, 陈杰. 轮式移动机器人滑移量重建与滑移补偿控制 [J]. 控制与决策, 2010, 25(05): 701-705.
- [47] 武仲斌, 谢斌, 迟瑞娟. 基于滑转率的双电机双轴驱动车辆转矩协调分配 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 66-76.
- [48] 袁野, 丁亮, 杨超杰. 基于单目视觉的星球车车轮沉陷量和滑转率实时检测 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(24): 259-267.
- [49] Liao J, Chen Z, Yao B. Model-based coordinated control of four-wheel independently driven skid steer mobile robot with wheel–ground interaction and wheel dynamics[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(3): 1742-1752.
- [50] Shi Q, Wang M, He Z, et al. A fuzzy-based sliding mode control approach for acceleration slip regulation of battery electric vehicle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35(1): 72.
- [51] Prado A J, Torres-Torriti M, Cheein F A. Distributed tube-based nonlinear MPC for motion control of skid-steer robots with terra-mechanical constraints[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(4): 8045-8052.
- [52] Kayacan E, Kayacan E, Ramon H, et al. Robust tube-based decentralized nonlinear model predictive control of an autonomous tractor-trailer system[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 20(1): 447-456.
- [53] Ke F, Li Z, Yang C. Robust tube-based predictive control for visual servoing of constrained differential-drive mobile robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(4): 3437-3446.

- [54] Mohammadpour E, Naraghi M. Robust adaptive stabilization of skid steer wheeled mobile robots considering slipping effects[J]. *Advanced robotics*, 2011, 25(1-2): 205-227.
- [55] Unsal C, Kachroo P. Sliding mode measurement feedback control for antilock braking systems[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1999, 7(2): 271-281.
- [56] Wong J Y. Theory of ground vehicles [M]. John Wiley & Sons, 2022.
- [57] 陈晓菲, 刘平, 杨明亮. 基于滑转率的四轮轮边驱动客车电子差速控制策略 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2019, 33(03): 51-58.
- [58] 汪步云, 彭稳, 梁艺. 全地形移动机器人悬架机构设计及特性分析 [J]. *机械工程学报*, 2022, 58(09): 71-86.
- [59] 彭稳. 全地形移动机器人悬架参数优化及力矩分配特性研究 [D], 2022.
- [60] 何文鹏. 基于动力学特性的全地形移动机器人机构优化设计研究 [D], 2023.
- [61] Wang H, Nagayama T, Su D. Estimation of dynamic tire force by measurement of vehicle body responses with numerical and experimental validation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 123: 369-385.
- [62] Zhang Z, Sun C, Bridgelall R, et al. Road profile reconstruction using connected vehicle responses and wavelet analysis[J]. *Journal of Terramechanics*, 2018, 80: 21-30.
- [63] Tudón-Martínez J C, Fergani S, Sename O, et al. Adaptive road profile estimation in semiactive car suspensions[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(6): 2293-2305.
- [64] Sun M, Le Bastard C, Wang Y, et al. Time delay and interface roughness estimation using modified ESPRIT with interpolated spatial smoothing technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 56(3): 1475-1484.
- [65] LING Q, DAI Juchuan C, SUN F, et al. Road Roughness Recognition Based on Vehicle Body Dynamic Response of Tracked Vehicles[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(01): 62.
- [66] Li L, Wang F Y, Zhou Q. Integrated longitudinal and lateral tire/road friction modeling and monitoring for vehicle motion control[J]. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 2006, 7(1): 1-19.
- [67] 彭晓燕. 汽车线控制动系统安全控制技术研究[D]. 湖南大学, 2013.
- [68] 孙振耀, 马光同, 徐帅. 轨道车辆永磁牵引电动机控制技术综述 [J]. *铁道学报*, 2023, 45(06): 26-40.
- [69] 张泉, 白继刚. 伺服电机控制技术相关研究 [J]. *南方农机*, 2023, 54(02): 35-37.
- [70] 孙洪博, 张晓宇, 柳向斌. 永磁同步电机无传感器控制研究综述 [J]. *控制工程*: 1-15.
- [71] 张国强, 杜锦华. 永磁同步电机无位置传感器控制技术综述 [J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(01): 1-13.
- [72] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制——现状与挑战 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(03): 222-236.
- [73] Tavernini D, Metzler M, Gruber P, et al. Explicit nonlinear model predictive control for electric vehicle traction control[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 27(4): 1438-1451.
- [74] 张辉, 万芳, 白锦洋, 等. 基于 Matlab 与 ADAMS 联合仿真的 ABS 系统分析[J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2017, 35(05): 742-744+768.

- [75] 陈勇军,韩霄翰,张炎,等.基于 ADAMS 与 Simulink 的六自由度摇摆台系统联合仿真研究 [J].工程机械,2021,52(02):59-66+9.
- [76] 焦鑫兆, 陈健龙, 郭光远. 基于 ADAMS 和 MATLAB 的双轴转台机电联合仿真 [J]. 弹箭与制导学报, 2022, 42(01): 54-59.

攻读硕士专业学位期间学术成果

参与项目：

[1] 2022 年安徽省经信委“揭榜挂帅项目”：“制造业重点领域产学研用补短板产品和关键共性技术攻关任务揭榜”- 新一代嵌入式无人叉车专用控制器及片上系统研发(JB22031)。

[2]安徽省属公办普通本科高校领军骨干人才项目。

[3]芜湖市高层次科技人才团队“智能移动机器人运动控制及调度系统产业化项目”。

[4] 产学研合作项目(横向项目):搬运型 AGV 运动控制及作业调度系统研发,徐州徐工特种工程机械有限公司。

论文及专利发表情况：

[1] **, ***, ***等. Study on hybrid PID control of multi-terrain mobile robot based on moment balance mechanism [C]. ICARCE2022 (已录用).本人一作。

[2] **, ***, ***等.Design of a Moment Suspension Mechanism for Off-road Operation of an Multi-terrain Mobile Robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering(EI)-已接收, 导师一作, 本人二作

[3] 一种全地形移动机器人主动车身稳定机构-**; ***-CN116787974A-审中-发明.

[4] 一种叉车中控总装线装配生产系统及其使用方法 -**; ***-CN114735425A-审中-发明;

[5] 一种叉车中控总装线装配生产系统-**; ***- CN218520434U-有效-实用新型;

致 谢

从研一开始进入实验团队，直到现在研三马上毕业，时间如白驹过隙。在这三年的学习与科研生涯中，我不仅仅获得了丰富的知识，更是通过不断的实践与探索，提升了自己的工程能力和科研能力。

首先，感谢我的导师汪步云老师，细心地指导我学习课题所需的理论基础，涵盖数学、力学、控制理论，使我能够迅速全面地掌握课题的基础知识。其次，我要感谢我的校外导师王志和杨鸥。他们作为业界资深人士，对于我的研究方向和项目实践给予了大量的指导和支持，分享的行业前沿资讯、项目经验以及对问题的深刻思考都使我受益匪浅，为我今后的科研之路奠定了坚实的基础。

此外，感谢何文鹏师兄、蒋金城师兄、缪龙师兄和李正正师兄，你们在学术探讨、项目合作以及生活中都给予了我无私的帮助和支持，你们的睿智和勤奋激励着我不断前行，成为了我学术道路上的良师益友，同时，也感谢徐腾、束勤平和耿郑一同学，在论文撰写、实验设计以及问题讨论中，我们相互学习、相互促进，共同成长，还要感谢师弟刑曦辰、张宁禧、张旭阳、刘祥和严翕然，你们的刻苦学习激励着我不断进步，特别感谢芜湖云擎机器人科技有限公司的李震、杨志凯和史明超，在实验调试中对我的指导，使我更快地完成了实验任务。

同时，我要感谢我的父母赵金柱和蒋开萍，在我求学的道路上，父母的支持和关怀是我最大的动力和精神支柱，虽然你们无法时刻陪伴在身边，但你们的支持和关爱始终伴随着我，给了我无限的勇气和力量，让我能够克服一切困难，勇往直前。最后，我要衷心感谢评审专家和答辩组老师们，感谢你们提出的宝贵建议和指导，使我的论文能够更加完善和精彩。你们的辛勤付出为我的学术之路增添了一道道光辉的风景线，让我深感荣幸与感激。

姓名：赵兵

日期：2024 年 5 月 20 号

尚德敏学 唯实惟新

