

# 北方工业大学

## 硕士学位论文



### 低郁密度条件下果园轮式机器人行间运行控制方法研究

学 生 姓 名 \_\_\_\_\_ 韩奕非

学 号 \_\_\_\_\_ 2020316190104

学科(专业学位) \_\_\_\_\_ 电子信息(控制工程方向)

研 究 方 向 \_\_\_\_\_ 智能机器人

导 师 \_\_\_\_\_ 毕松

校 外 导 师 \_\_\_\_\_ 李睿凡

2023 年 5 月 8 日

Research on inter-row Navigation Control method of Orchard  
mobile robot under low planting density conditions

By

Han Yifei

A Dissertation Submitted to

North China University of Technology

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Master of Engineering

North China University of Technology

May, 2023

# 低郁密度条件下果园轮式机器人行间运行控制方法研究

## 摘 要

目前,我国农业装备自动化程度低,使得农业生产人工需求量和劳动强度较大。研究符合我国实际需求的农业自动化装备已是提升我国农业竞争力的必然需求。本文针对果园环境,对轮式差速转向机器人控制及行间自主问题进行分析。果园机器人的工况多处于户外环境,机器人处于户外工况时受天气变化及路面起伏不平等影响较大。如何使机器人在复杂情况下仍然能够完成自主运行,以及拥有较好的控制精度是当前果园移动机器人的重要问题。

本文梳理了滑动轮式转向机器人(以下简称机器人)相关基础理论,并根据理论指导进行了机器人的三维建模。为了机器人自主运行算法的开发与验证,本文搭建了机器人多体动力学仿真环境,并依据仿真结果对机器人进行动力学选型。机器人参数估计与控制部分,本文提出了非铺装路面滑动转向轮式机器人轮胎垂直载荷实时估计方法和轮胎驱动力实时估计及优化分配算法。在该方法中首先提出了适用于滑动转向过程静力学计算的理想平面以及基于该平面的四轮垂直载荷估计方法;其次,提出了基于 FIALA 轮胎动力学模型的小侧偏角侧向力估计方法;再次,建立了滑动转向轮式机器人坡道稳态动力学方程和轮胎实时驱动力估计方法;最后,基于轮胎利用率构造轮胎驱动力最优实时分配模型。垂直载荷估计精度为 90%以上,侧向力实时估计准确率为 92%以上,基于轮胎垂直载荷以及侧向力的轮胎驱动力优化方法使轮胎利用率从 96.25%降低至 93.75%。本文最后对机器人自主运行问题进行分析,提出了以激光雷达传感器为基础的户外自主导航方法。利用点云处理方法对行间点云信息进行处理,减少了干扰点云,减少了点云总体数量。将处理后的点云通过随机采样一致方法拟合生成导航线。经实际点云验证,机器人在大航向角与小航向角下均可生成较好的导航线。本文最后分析了三种轨迹跟踪器在不平路面的跟踪效果,结果显示模糊控制器对不平路面适应性最优。

**关键词:** 户外机器人, 差速转向, 轮胎动力学, 参数估计, 轨迹跟踪

# Research on inter-row Navigation Control method of Orchard mobile robot under low planting density conditions

## Abstract

At present, the low degree of automation of agricultural equipment in China makes agricultural production labor demand and labor intensity. Research on agricultural automation equipment that meets the actual needs of China has been an inevitable need to improve the competitiveness of China's agriculture. In this paper, we analyze the control and inter-row autonomy problems of wheeled differential steering robots for orchard environment. The working conditions of orchard robots are mostly in outdoor environment, and the robots are affected by weather changes and road undulations when they are in outdoor working conditions. How to make the robots operate autonomously under complicated conditions and have good control accuracy is an important problem for the current orchard mobile robots.

This paper compares the basic theory of sliding wheel steering robot (hereinafter referred to as robot) and carries out 3D modeling of the robot according to the theoretical guidance. For the development and verification of the robot autonomous operation algorithm, a multi-body dynamics simulation environment is built and the robot dynamics is selected based on the simulation results. In the robot parameter estimation and control part, this paper proposes a real-time estimation method for the vertical load of the tire of a sliding steering wheeled robot on a non-paved road and an algorithm for real-time estimation and optimal distribution of the tire drive force. In this method, firstly, an ideal plane for the static calculation of the sliding steering process and a four-wheel vertical load estimation method based on this plane are proposed; secondly, a small lateral deflection angle lateral force estimation method based on the FIALA tire dynamics model is proposed; secondly, the steady-state dynamics equations of the sliding steering wheeled robot ramp and the real-time tire drive force estimation method are established; finally, a tire utilization rate based. Finally, the optimal real-time distribution model of tire driving force is constructed based on the tire utilization rate. The accuracy of vertical load estimation is more than 90%, the accuracy of lateral force estimation is more than 92%, and the tire drive force optimization method based on vertical load and lateral force reduces the tire

utilization rate from 96.25% to 93.75%. The paper concludes with an analysis of the robot autonomous operation problem and proposes an outdoor autonomous navigation method based on LiDAR sensors. The inter-row point cloud information is processed using a point cloud processing method, which reduces the number of interfering point clouds and the overall number of point clouds. The processed point clouds are fitted by a random sampling consistent method to generate navigation lines. The actual point cloud is verified that the robot can generate good navigation lines at both large and small heading angles. Finally, the paper analyzes the tracking effect of three trajectory trackers on uneven road surfaces, the results show that the fuzzy controller adapts optimally to the uneven road surface.

Key words: Outdoor robotics, differential steering, tire dynamics, parameter estimation, trajectory tracking

# 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外果园滑动轮式机器人自主运行研究现状 .....	2
1.2.1 滑动转向机器人运行控制研究现状.....	2
1.2.2 滑动转向机器人运行参数估计研究现状 .....	3
1.2.3 滑动转向机器人自主运行研究现状.....	4
1.3 本文主要研究内容与组织结构 .....	5
1.3.1 主要研究内容.....	5
1.3.2 组织结构.....	5
1.4 本章小结.....	6
第二章 轮式滑动转向机器人相关原理 .....	7
2.1 差速转向机器人运行学.....	7
2.1.1 差速转向理想运动学分析.....	7
2.1.2 差速转向考虑滑移的运动学分析.....	9
2.2 轮胎动力学.....	10
2.2.1 轮胎动力学模型.....	11
2.2.2 轮胎参数分析.....	12
2.3 差速转向动力学.....	16
2.4 本章小结.....	19
第三章 轮式滑动机器人机械设计与仿真搭建 .....	20
3.1 机器人机械结构设计.....	20
3.2 仿真搭建.....	24
3.2.1 多体动力学模型.....	24
3.2.2 电机仿真模型.....	27
3.3 本章小结.....	29
第四章 垂直载荷估计与驱动力优化分配方法 .....	31
4.1 意义与方法.....	31
4.2 机器人垂直载荷估计.....	32
4.3 驱动力优化分配.....	39
4.4 仿真验证.....	42
4.4.1 垂直载荷估计方法验证.....	43
4.4.2 驱动力优化分配方法验证.....	46
4.5 本章小结.....	49
第五章 机器人行间自主运行 .....	50

5.1 点云处理与导航线生成.....	50
5.2 果园环境下轮式滑动转向机器人轨迹跟踪方法研究 .....	54
5.2.1 PID 轨迹跟踪方法 .....	54
5.2.2 模糊控制方法.....	55
5.2.3 纯追踪方法.....	56
5.2.4 轨迹跟踪方法仿真实验.....	58
5.3 本章小结.....	60
第六章 总结与展望 .....	61
6.1 工作总结.....	61
6.2 研究展望.....	62
参考文献.....	63

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

我国是水果生产大国，近年来我国水果产业对于 GDP 的贡献率日益增加，对我国社会经济发展发挥了重要作用<sup>[1]</sup>。近十年来，我国水果产量从年产量 2.21 万吨增长到 2.93 万吨，但随着水果生产规模日益扩大以及城镇化的进程加快，导致农业用工成本不断上升。目前，我国农业装备自动化程度低，使得农业生产人工需求量和劳动强度较大<sup>[2][3]</sup>。同时，伴随着智慧农业这一概念的兴起，人们对于提升蔬菜种植过程中装备的智能化水平的需求也愈来愈烈。《中国制造 2025》已经将智能农机装备列为重点发展方向<sup>[4][5]</sup>。目前，研究符合我国实际需求的农业自动化装备已是提升我国农业竞争力的必然需求<sup>[6]</sup>。

目前我国果园种植的劳动内容主要包括播种、植保、采收、搬运等<sup>[7]</sup>。人工完成以上工作具有耗时费力、作业集中等特点，同时人工作业不利于精确控制喷药量等种植指标并且人工作业受天气影响较大。我国果园种植多以行间间作的模式进行规范化种植。果园内果树行与行之间基本平行，虽然果园大多地处山区，地势起伏不定，但树行间通行区域多经过硬化平整处理。以上条件有利于机器人等智能设备进行自主作业。

为了扩大生产面积，在农业生产过程中智能化设备如采摘机械臂、除草机、智能喷药等都离不开移动底盘的协助，农业移动机器人也因此逐渐步入人们的视野。移动机器人按照运行方式可分为差速履带式、轮式滑动转向、阿克曼式、全轮独立转向式<sup>[8]</sup>。其中轮式滑动转向移动机器人具有结构简单、运行可靠和制造成本低的优点，受到农业机器人领域研究人员的关注。对于轮式机器人来说，相较于室内作业的移动机器人，户外环境和越野地形环境更为复杂。由于地形条件(如沙、泥、草)和地形(如斜坡、崎岖)，在室外环境中轮式机器人的控制和导航是一个困难的挑战。在越野环境和崎岖地形中，移动机器人在导航过程中必须面对两个主要的问题，第一个是坡道与起伏不平的地形造成机器人动力学参数变化。第二是户外环境对于自主导航的挑战，户外作业受雨水光照以及果树生长趋势等影响导致路径生成、轨迹跟踪、自主避障等均有一定难度<sup>[9]</sup>。



## 1.2 国内外果园滑动轮式机器人自主运行研究现状

轮式滑动转向机器人因为具有转向灵活、构造简单、方便维护等原因已经广泛应用于室内场景,如服务机器人、物流机器人、巡检机器人等。目前也有更多学者将轮式滑动转向机器人应用于户外场景,果园轮式差速转向机器人的典型工作区域就是户外种植园行间区域。由于轮式滑动转向机器人的转向过程主要依靠轮胎与路面的滑移过程,该滑移过程导致该类机器人运动过程的参数变化范围较大。同时由于果园路面坡度与不平度的影响更加难以对机器人运动过程精确建模,从而导致该类机器人的精确控制难度较大。由于果树种植不可能完全保证行与行之间的平行以及单行的直线度,所以导航线生成与轨迹跟踪也是果园轮式机器人一大技术难题。因此,如何对滑动转向机器人运动过程中的可变参数进行估计然后加以相应控制以及如何生成导航线并设计轨迹跟踪方法是研究人员关注的重点问题。

### 1.2.1 滑动转向机器人运行控制研究现状

在滑移转向基础研究方面,郁录平<sup>[10]</sup>等对滑动转向车辆进行了运动学,动力学分析。运动学不考虑滑移问题,动力学方面利用牛顿力学方法进行力与力矩的平衡。将路面与轮胎之间的作用力看做摩擦系数与正应力的一次函数。提出了滑动转向机器人转向的结构条件。张国君<sup>[11]</sup>等提出的滑动运动学模型考虑了车辆运动时瞬心的偏移,同时利用拉格朗日动力学对机器人进行了动力学分析。任城钰<sup>[12]</sup>等通过对滑移转向车辆坡道静力学,滑移转向力学,运行功率等分析提出了四轮滑移转向底盘的最佳轮距、轴距关系和滑移功率,以更好地服务四轮滑移转向机器人的驱动单元选型。丁亮<sup>[13]</sup>等为了进一步分析崎岖路面上的机器人动力学,分析了轮土相互作用过程中车轮滑移或横向滑移前进的土力学模型。文中还对机器人处于坡道的运行情况进行了研究,重点分析了爬坡以及横过斜坡时的轮地作用力。郭晓林<sup>[14]</sup>等建立了六轮滑移转向模型,提出了基于滑移率的运动学模型,并根据转向瞬心计算侧偏角,从而得到转向,同时根据转向瞬心计算的到侧偏角,建立了六轮车辆的运动学方程,该方法更适用于极度松软的土地情况,并且同样没有对垂直载荷进行计算。闫永宝<sup>[15]</sup>利用轮胎动力学中的魔术公式作为轮胎与地面作用力的解算方法,提高了纵向力与侧向力的计算精度。由于魔术公式需要对轮胎进行大量拟合仿真工作,因此工作难度较大。张高峰<sup>[16]</sup>等分析了基于瞬心法的车辆运动学,将左右侧轮胎看做分别围绕两个瞬心的旋转运动,利用内外侧轮胎瞬心到车辆纵向对称面的距离评判转向稳定性。动力学方面,对于坡道匀速转

向进行了分析,但只限于垂直或平行于坡道没有考虑机器人处于坡道任意位姿下的垂直载荷以及动力学模型。陈晋市<sup>[17]</sup>等研究了桥荷分配对轮式滑移装载机行走性能的影响,分析了不同重心位置下整车的轮地接触特性,提供了利于转向的整车前后轴载荷分配指标。丁东<sup>[18]</sup>采用模糊 PID 闭环反馈控制方法,提出了一种基于转速反馈的差速滑移转向控制策略,实验表明其控制效果优于传统 PID 方法。洪濡<sup>[19]</sup>等提出了一种横摆力矩运动控制算法,根据扩展卡尔曼滤波算法设计了车辆动态参数观测器,根据车辆的目标车速与转向半径计算所需要的横摆力矩,针对各轮的纵向力进行优化分配算法的设计。Yacoub<sup>[20]</sup>等将轮式滑动转向机器人按照驱动轴的奇数与偶数进行区分,提出了多轴滑移转向车辆牵引力矩需求预测方法,并且对四轴、六轴、八轴车辆进行了验证。Jianfeng Liao<sup>[21]</sup>等建立了滑动转向机器人完整模型,其包括机器人运动学、机器人动力学、车轮动力学。基于以上提出的综合模型设计了基于动态模型的协调自适应鲁棒控制方法,该控制器一般由机器人动力学不同部分的三级设计组成,直接生成四个轮子的电机驱动转矩命令。

### 1.2.2 滑动转向机器人运行参数估计研究现状

由于成本低,转向灵活等原因滑动转向机器人已经广泛应用于室内服务机器人,室内物流机器人等室内工况下。相较于室内,户外工作条件下受路面起伏影响机器人动力学参数,路面参数发生较大变化。通过先进手段对机器人及环境参数进行有效估计是提高机器人运行精度的重要保障。目前已经有许多学者对此进行研究。

李宣政<sup>[22]</sup>提出了一种针对不平路况的路面附着系数估计算法。通过最小二乘法基于滑移率与路面附着系数关系提取当前路面的实时摩擦系数。周伟等<sup>[23]</sup>提出一种利用扰动极值搜索算法估计动态路面附着系数的车辆驱动防滑控制策略。搭建车辆动力学系统模型,采用极值搜索方法得到当前路面最大附着系数。张晓龙等<sup>[24]</sup>利用 Burckhardt 模型,标定了 6 种不同道路的路面附着能力的峰值变化范围,以峰值对不同路面进行参数识别。熊喆等<sup>[25]</sup>通过遗忘因子递推最小二乘法对轮胎路面的附着系数进行实时评估。白洋洋<sup>[26]</sup>设计了滑移转向机器人里程计模型及其误差,该方法可利用左右轮速以及滑移率作为 k-近邻算法的特征值对路面进行较好的识别。Dogru 等<sup>[27]</sup>提出了一种任意表面摩擦系数表示方法并对机器人运行功率进行了分析,结果表明滑移转向的功率与车辆转动半径以及车轮侧偏角有关。张家旭等<sup>[28]</sup>提出一种基于非线性干扰观测器的车轮滑移率跟踪控制方法。首先,基于 1/4 车辆动力学模型建立车轮滑移率跟踪模型,并采用幂函数和线性函数相结

合的方式设计非线性干扰观测器,估计和补偿车轮滑移率。李静等<sup>[29]</sup>基于 Burckhardt 模型建立车轮滑移率跟踪控制模型,将模型简化过程中的不确定性考虑成复合干扰项,将轮胎侧向力对纵向力的影响考虑成未知参数,利用双曲正切函数和终端吸引因子设计改进的跟踪微分器,平滑车轮滑移率跟踪误差和估计车轮滑移率。Fangxu 等<sup>[30]</sup>提出了一种在越野地形上对滑移转向机器人位置姿态、速度以及滑移率进行估计的方法。该方法基于多信息无迹卡尔曼滤波融合了不同传感器与数据。鲁浩<sup>[31]</sup>采用 Levenberg-Marquardt 算法对滑动参数进行估计,该方法减小了轨迹预测误差。

### 1.2.3 滑动转向机器人自主运行研究现状

户外机器人自主导航按照定位方式不同可分为基于卫星定位的导航方法、基于激光雷达的导航方法以及基于视觉的导航方法。由于果园环境下植被郁密度较大以及果树生长较高等原因导致卫星信号遮挡严重,固一般情况下卫星定位更多应用于大田作业。在果园下的自主运行更多应用激光雷达以及视觉的定位方法。李天华等<sup>[32]</sup>通过语态挂载摄像头的方式,利用图像处理的方式提取两行果树之间可通行区域尽头的横向中心点坐标获得导航信息。该方法精度较高,但是受天气与光照影响较大。张雄楚等<sup>[33]</sup>将视觉导航方法应用于灰枣与骏枣果园,在两个果园内检测准确率分别为 94%与 93%,且单帧图像处理时间较快。但同样受到路面不平造成的抖动以及光照等影响易出现检测错误的情况。毕松等<sup>[34]</sup>同样利用视觉处理的方法基于实例分割神经网络的偏航角、横向偏移、果树位置计算方法,实验结果表明方法的偏航角估计误差为 2.91%、横向偏移误差为 4.82%果树横向定位误差为 3.80%,纵向误差为 2.65%。LI Y 等<sup>[35]</sup>针对于复杂的丘陵山地道路情况提出一种基于低成本双目视觉系统的丘陵山地道路自主导航线提取方法。在复杂的山地曲线路况上,平均偏差为 0.069 米,最大偏差为 0.195 米。

根据对视觉导航的调研情况,目前基于视觉的导航方式多存在以下问题。首先由于图像包涵大量信息导致处理速度较慢,其次视觉导航成功率受光照等天气影响较大,最后由于户外环境起伏不平导致异常相机抖动。而基于点云信息的激光雷达导航方式简化了计算机处理难度并且由于不受光照等影响可以拥有更长的作业时间,目前有许多学者对激光雷达的室外导航方法开展了研究。李秋洁等<sup>[36]</sup>提出采用二维激光雷达的行间路径提取方法,实验表明车辆在自主导航时横向偏差在 $\pm 14\text{cm}$ 之内。倪江楠等<sup>[37]</sup>采用激光测距仪获取道路信息、增量式 PID 反馈调节作为农机控制方法,提出应用于农机自主行走的激光扫描路径规划与导航算法。刘星星<sup>[38]</sup>提出一种基于最小二乘法与支持向量机融合的树行识别与导航方

法。实验装置为履带差速转向小车,通过激光雷达获取果树行间环境点云并且利用融合陀螺仪进行数据校正,利用最小二乘法拟合识别树行配合 SVM 算法,生成自主作业需要的导航线。艾长胜等<sup>[39]</sup>将基于激光雷达的导航方法应用于葡萄园自主运行机器人。该算法为将激光雷达的点云数据进行预处理,采用卡尔曼滤波的方式剔除噪声。同样本文结合支持向量机的方法生成导航线。荷兰学者 Pieter 等<sup>[40]</sup>基于 2 维激光雷达进行户外机器人自主导航。作者设计使用粒子滤波器和卡尔曼滤波器两种方法进行比对在果园中进行自主导航,试验提取了高低速下两种方法生成导航线的准确率,结果表明粒子滤波器的效果明显优于卡尔曼滤波器。

## 1.3 本文主要研究内容与组织结构

### 1.3.1 主要研究内容

本文针对果园环境下的轮式滑动转向机器人运动控制问题与自主运行问题展开研究与分析。研究了适用于户外不平路面及坡道下的机器人运动控制问题,主要涉及机器人动力参数估计以及根据机器人运行情况的动力分配问题。其次针对规范种植的低郁密度果园,研究机器人导航路径生成以及机器人沿目标点轨迹跟踪问题。具体内容如下:

#### (1) 针对户外条件的机器人参数估计以及动力优化

基于机器人自身参数以及当前位姿,研究了四轮滑动转向机器人的垂直载荷以及侧向力实时估计方法。研究了坡道状态下机器人稳态动力学,通过稳态动力学解算机器人目标驱动力。同时本文研究了机器人轮胎实时附着情况估计,研究了根据各轮附着情况实时调整各轮驱动力的分配方法。基于以上方法,实现了根据垂直载荷以及机器人姿态信息的重要参数估计以及驱动力分配。

#### (2) 规范种植下差速机器人导航线生产与轨迹跟踪

利用二维激光雷达提取两行果树点云信息,利用激光雷达点云处理方法对离群点以及近处干扰点进行剔除。通过拟合手段提取两侧果树直线方程,并根据两侧方程生成导航线。机器人由于没有采用全局定位,因此时刻以机器人为坐标原点,通过计算机器人与目标点的纵向偏差与横向偏差生成目标点信息。本文对比了三种不同轨迹跟踪算法在不平道路下的跟踪效果,选择了效果最佳的控制方法进行了进一步验证。

### 1.3.2 组织结构

根据本文的研究内容,本文分为六个章节,每章节的概述如下:

第一章阐述了本文内容的研究背景，研究目的与意义。分析了轮式滑动转向机器人控制与自主导航相关研究现状，同时介绍了目前使用的方法策略。最后介绍了本文主要研究方向和文章结构组织。

第二章主要介绍了轮式滑动转向机器人相关原理，包括运动学、瞬态动力学、轮胎动力学。同时推导了适用于果园条件下的四轮滑动转向机器人坡道稳态动力学。

第三章主要根据本文实际使用需求与环境进行了机器人本体的机械结构设计，动力选型以及重要零件的强度校核工作。其次，完成了机器人动力学仿真环境的搭建，为后续算法验证进行准备工作。

第四章主要针对果园环境下的轮式滑动转向机器人控制问题展开研究。主要完成了垂直载荷以及侧向力参数实时估计。同时为提高机器人运行稳定性，根据所估计的基本参数完成驱动力优化分配工作。

第五章对果园环境下机器人自主导航问题展开研究。首先为了提高点云数据准确度进行了激光雷达点云数据处理，其次利用拟合方法将处理后的点云数据生成导航线。最后，分析了三种不同轨迹跟踪方法在果园路面下的控制精度。

第六章对本文工作进行分析总结，并对工作可提高的部分进行了展望。

### 1.4 本章小结

本章介绍了户外果园条件下的机器人运行控制与自主运行方法研究的目的与意义，分析了国内外对于差速转向机器运行控制方法与参数估计方法。同时对基于不同定位方式的自主运行方法进行了分析。最后介绍了本文的主要研究内容与组织结构。

## 第二章 轮式滑动转向机器人相关原理

轮式滑动转向机器人（后文简称机器人）转向过程中伴随着大量滑移状态，其运动学与动力学相较其他底盘形式的机器人有较大的区别。为了后文机器人运行控制方法与自主运行方法的研究本章对机器人的运动学与动力学原理进行介绍，讨论了滑移状态对机器人的影响。

### 2.1 差速转向机器人运行学

机器人运行学包括两种形式，其一为不考虑滑移影响的理想运动学，其二为考虑滑移影响的运动学。理想运动学多应用于机器人驱动命令解算，当已知机器人目标纵向速度以及目标横摆角速度后根据理想运动学解算两侧轮速。考虑滑移状态的运动学多应用于机器人运动以及动力参数估计。下面对两种运动学进行分别讨论分析。

#### 2.1.1 差速转向理想运动学分析

滑动转向因为在转向过程中伴随着大量滑移过程，因此被称为滑移转向机器人。机器人的工作原理与履带车辆相似，当直线行驶时内外侧驱动速度保持一致。当出现转向需求时，依靠内外侧轮速差产生横摆角速度使机器人航向角发生变化。通过调整内外侧轮胎不同速度可以达到不同的转向半径。设机器人左侧轮线速度为  $V_L$ ，右侧车轮线速度为  $V_R$ ，机器人整体纵向速度为  $V_G$ ，横摆角速度为  $W_Z$ ，机器人轴距为  $L$ ，轮距为  $B$ 。假设机器人质心位于其几何中心，理想状态下滑动转向运动学如图（2-1）所示。图中，机器人绕转向中心  $O$  做半径为  $R$  的逆时针转向运动。

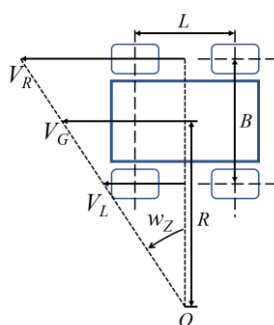


图 2-1 理想运动学

下面直接给出机器人在理想状态下的运动学方程，如下式（2-1）所示。

$$\begin{cases} V_G = \frac{V_R + V_L}{2} \\ W_z = \frac{V_R - V_L}{B} \\ R = \frac{B}{2} \left( \frac{V_R + V_L}{V_R - V_L} \right) \end{cases} \quad (2-1)$$

以上即为理想状态下的机器人运动学方程。设左前轮、左后轮、右前轮、右后轮转动角速度分别为  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ ，左侧旋转角速度为  $W_L$ ，右侧旋转角速度为  $W_R$ ，轮胎滚动半径为  $r$ 。由于不考虑滑移影响，滑动转向速度满足以下条件。

$$\begin{cases} V_L = W_1 r = W_2 r = W_L r \\ V_R = W_3 r = W_4 r = W_R r \end{cases} \quad (2-2)$$

由于滑动转向依靠左右两侧速度差完成，所以可以将左右两侧转速按式（2-3）表示。

$$W_R = kW_L \quad (2-3)$$

式中  $k$  为差速因子，表示了两侧车轮速度差。将公式（2-1）（2-2）（2-3）组合，得到机器人两侧速度差与转弯半径之间的关系，如式（2-4）所示。

$$R = \frac{v_G}{\omega_z} = \frac{B}{2} \cdot \frac{k+1}{k-1}, (k \neq 1) \quad (2-4)$$

令  $f(k) = (k+1)/(k-1)$ ， $f(k)$  代表滑移平台非直线运动形式函数， $f(k)$  图像如图(2-2)， $k=c$  和  $k=1/c$  的转向半径大小相同，方向相反，前者朝右，后者朝左。

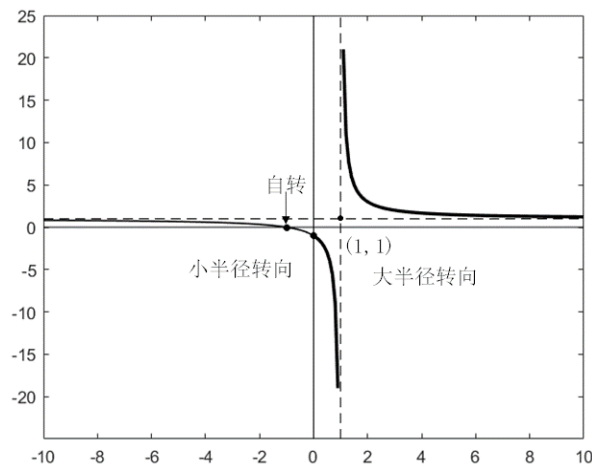


图 2-2 非直线运动函数图

## 2.1.2 差速转向考虑滑移的运动学分析

以上分析基于无滑移的运动状态。下面讨论考虑滑移状态下机器人的运动学，分析如图（2-3）所示。

当只考虑纵向滑移，不考虑侧向滑移时，机器人满足以下条件，如式（2-5）。

$$\begin{cases} V_L = W_1 r(1 - S_1) = W_2 r(1 - S_2) \\ V_R = W_3 r(1 - S_3) = W_4 r(1 - S_4) \end{cases} \quad (2-5)$$

式中  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  分别为左前轮、左后轮、右前轮、右后轮滑移率。这里关于纵向滑移率和侧向滑移率的定义与文献 UniTire 轮胎模型中的滑移率定义一致。假设同侧两轮纵向滑移率相等，左侧滑移率为  $S_L$ ，右侧滑移率为  $S_R$ 。根据公式可以得到的纵向滑移率与实际回转半径之间的关系，如式所（2-6）所示。

$$R_1 = \frac{B \cdot k(1 - S_R) + (1 - S_L)}{2 \cdot k(1 - S_R) - (1 - S_L)} = \frac{B \cdot k + 1 - (kS_R + S_L)}{2 \cdot k - 1 + (S_L - kS_R)} \quad (2-6)$$

当同时考虑机器人纵滑与侧滑时机器人运动产生侧滑因子  $S_0$ ，其为转动中心  $O$  与质心  $CM$  沿  $X$  轴方向的距离。

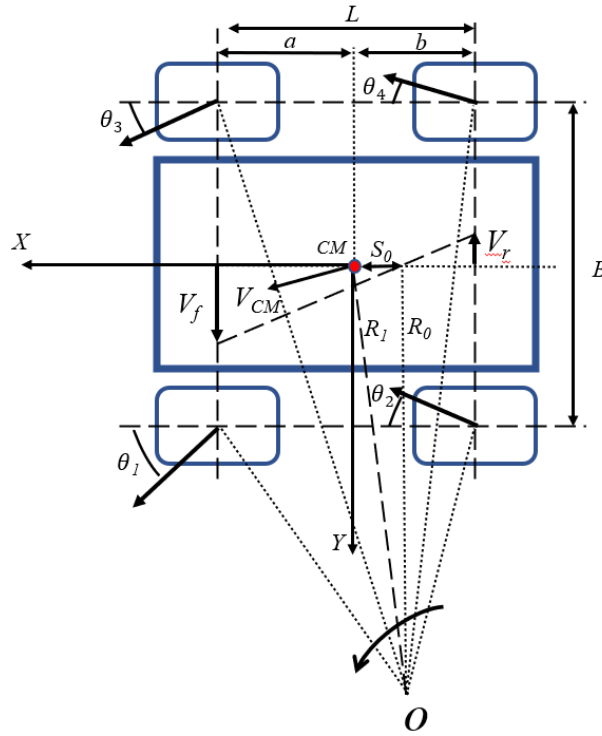


图 2-3 滑移状态运动学

如图（2-3）， $R_1$  为机器人实际转向半径， $R_0$  为滑移回转半径， $R_1$ 、 $R_0$  与  $S_0$  三者共同构成直角三角形，按照勾股定理，三者具有如下关系如式（2-7）所示。



$$R_0^2 = R_1^2 - S_0^2 \quad (2-7)$$

上图中  $V_f$  与  $V_r$  分别为前轴侧滑速度与后轴侧滑速度  $a$  与  $b$  分别为质心到前后轴的距离, 通过相似三角形可以推断出前后轴侧滑速度与侧滑因子之间的关系如式 (2-8) 所示。

$$\frac{V_f}{a + S_0} = \frac{V_r}{b - S_0} \quad (2-8)$$

通过上式可以看出质心与几何中心偏移距离影响了机器人前后轴侧滑速度, 距离偏差越大, 侧滑速度偏差越大。上图中  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$  分别为左前轮左后轮右前轮与右后轮的侧偏角。下面给出各轮侧偏角与侧滑因子之间关系如式 (2-9) 所示。

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan \frac{a + S_0}{R_0 - B/2} \\ \theta_2 = \arctan \frac{b - S_0}{R_0 + B/2} \\ \theta_3 = \arctan \frac{a + S_0}{R_0 + B/2} \\ \theta_4 = \arctan \frac{b - S_0}{R_0 - B/2} \end{cases} \quad (2-9)$$

侧偏角为轮胎重要输入参数, 对轮胎力输出产生重要影响, 对侧偏角的准确估计直接影响了机器人运行控制精度。

## 2.2 轮胎动力学

在机器人运行过程中, 作用于机器人的所有主动力与被动力(除空气阻力外)均来源于轮胎与地面的相互作用。因此车轮与地面之间的作用力与方向直接影响了机器人如何转向、加速以及减速<sup>[41]</sup>。为深入理解机器人的运行原理, 需对轮胎特性进行一定分析。目前, 为了能够对轮胎性能进行建模分析, 学者们提出了不同的轮胎动力学模型架构。轮胎动力学模型是用来描述轮胎在车辆行驶过程中力学特性的数学模型。它通常由多个子模型组成, 包括侧偏角侧偏力模型、侧偏刚度模型、纵向力模型、横向力模型等。这些子模型可以分别描述轮胎在不同方向上的受力特性, 从而帮助分析轮胎在车辆运动过程中的行为。轮胎动力学模型在车辆动力学、车辆控制等领域中都有重要应用。轮胎动力学模型的应用示意图如

(2-4) 所示。

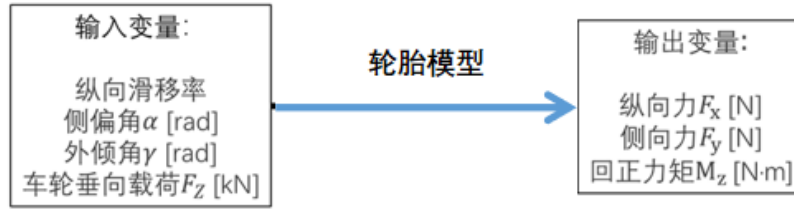


图 2-4 轮胎模型

轮胎动力学依靠滑移率、侧偏角、外倾角、垂直载荷等参数输入计算得出当前轮胎承受的纵向力、侧向力以及回正力矩等重要轮胎力学特性。在轮胎动力学模型中，侧偏角侧向力模型是其中最重要的子模型之一。它描述了轮胎在侧向力作用下产生的侧偏现象，以及侧偏角和侧偏力之间的关系。侧偏刚度模型则描述了轮胎在侧向偏移时产生的回复力，以及侧偏角和侧偏力的变化关系。纵向力模型和横向力模型则分别描述了轮胎在纵向和横向方向上产生的力，以及这些力和轮胎负载、路面摩擦等因素之间的关系。为进一步说明轮胎动力学模型，下面对应用最为广泛的魔术公式模型以及 Fiala 模型进行分析，由于本文机器人不涉及回正力矩，下面只对纵向力以及侧向力进行分析。

### 2.2.1 轮胎动力学模型

#### (1) 魔术公式模型

目前在车辆动力学中应用最为广泛的轮胎动力学模型就是魔术公式模型。魔术公式采用特殊的基于拟合的正弦函数建立轮胎的纵向力、横向力和回正力矩模型。因为三个计算模块只需一组公式即可解出固称为魔术公式。魔术公式纵向力计算模型如图（2-5）所示。

$$\begin{cases} F_l = (D \sin(c \times \arctan(BX_1 - E(BX_1 - E(BX_1 - \arctan(BX_1)))))) + s_v \\ X_1 = s + s_h \\ C = B_0 \\ D = B_1 F_z^2 + B_2 F_z \\ B = (B_3 F_z^2 + B_4 F_z) \times e^{-B_5 F_z} / (C \times D) \\ s_h = B_9 F_z + B_{10} \\ s_v = 0 \\ E = B_6 F_z^2 + B_7 F_z + B_8 \end{cases} \quad (2-10)$$

上图中， $F_l$  为待求解纵向力， $S$  为纵向滑移率， $s_h$  为曲线的水平方向漂移， $s_v$  为曲线的垂直方向漂移。C 为曲线的形状因子，D 为曲线因子，B 为刚度因子，E 为曲线的曲率因子。其中  $B_0$  至  $B_{10}$  为待拟合参数。对于魔术公式侧向力求解，

公式中输入参数与纵向力基本相同,只将带待拟合参数由  $B_0$  至  $B_{10}$  变为  $A_0$  至  $A_{13}$  以及将纵向力模型中输入的滑移率替换为侧偏角,从上图分析可以看出,魔术公式的应用需要大量的参数拟合工作,因此该轮胎动力学模型属于经验模型<sup>[42]</sup>。同时可以看到,对魔术公式影响因素最大的变量为垂直载荷  $F_z$ ,其数值直接影响了形状因子,曲线因子等关键参数。

## (2) Fiala 模型

Fiala 模型属于物理模型,在纵向方向 Fiala 模型将轮胎视为与地面接触的弹性刷子,这些刷子可以在与地面平行的方向上发生形变,如图(2-5)所示。

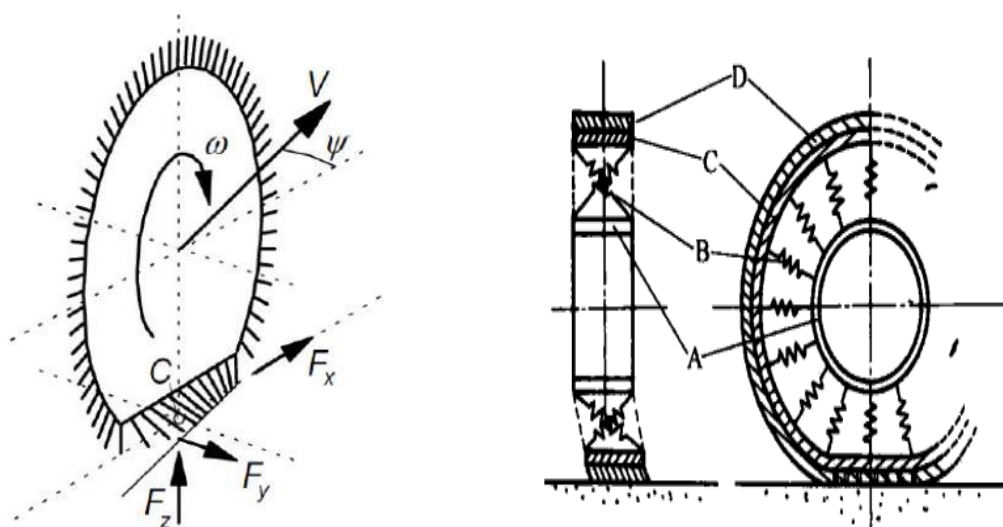


图 2-5 Fiala 轮胎模型

在侧向方向, Fiala 理论所提出的轮胎模型是解释轮胎侧偏现象时被广泛接受的模型理论。该模型通过将胎体带束视为建立在弹性基础上可以产生侧向变形的弹性梁,从而达到描述侧向变形的目的。侧向模型示意图如(2-5)右侧所示。该模型认为 A 轮辋为刚体, B 为等效弹簧, C 为台面基部胶, D 为胎面胶。根据该模型的发展理论,所有的轮胎受力都由物理变形导致,所以模型内部计算过程复杂,但对于应用者只需提供基本轮胎参数即可求解轮胎六分力,相较魔术公式使用更加方便灵活。

## 2.2.2 轮胎参数分析

本文机器人不涉及内倾角,固不考虑回正力矩。为进一步说明纵向力侧向力与滑移率和侧偏角的关系以及其他因素对数值大小影响,下面单独对纵向力以及侧向力展开分析。

### (1) 纵向力

轮胎纵向力即车辆驱动力。根据轮胎动力学模型,纵向力由轮胎纵向变形导

致，而这种变形的大小由滑移率进行表示，滑移率公式如（2-11）所示。

$$S = \frac{V_w - V_c}{V_w} * 100\% \quad (2-11)$$

上式中  $V_w$  为轮胎纵向速度， $V_c$  为车辆纵向速度。滑移率的大小为一百分比值，数值范围从-100%到+100%对应车辆减速时完全抱死状态以及加速时车轮完全打滑空转的状态。在小滑移率情况下（一般情况下视-5%至+5%范围内为小滑移率阶段）该阶段轮胎输出与滑移率呈线性关系，其公式如（2-12）所示。

$$F_x = C_l S \quad -5\% < S < 5\% \quad (2-12)$$

式中  $F_x$  为轮胎纵向力， $S$  为滑移率， $C_l$  为轮胎纵向刚度。轮胎纵向刚度与花纹，材料内部结构等有关，是轮胎固有属性。从上式中可以看出，当轮胎刚度变大时，同等轮胎变形条件下，轮胎输出纵向力更高。当滑移率超过线性区间，纵向力的输出进入非线性阶段，其具体数值大小与轮胎模型有关。通过 MATLAB 编写魔术公式轮胎模型，仿真轮胎纵向力模型下纵向力输出曲线。分析滑移率、纵向力、纵向刚度之间关系，如图（2-6）所示。

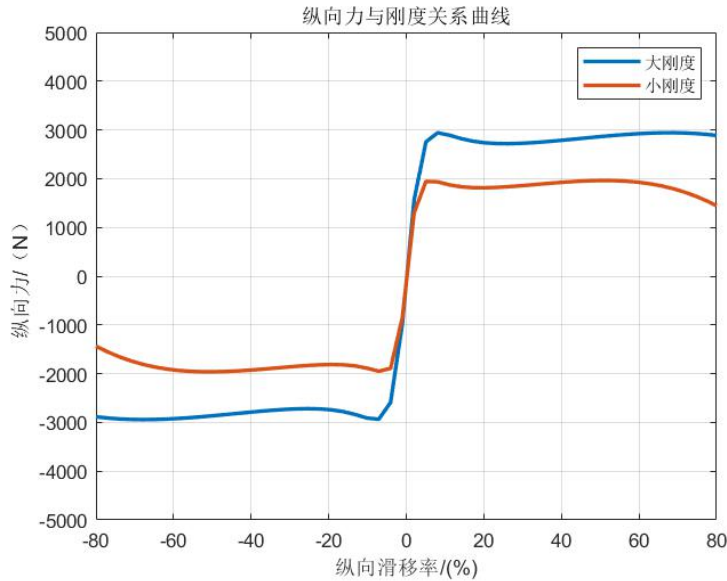


图 2-6 轮胎纵向力刚度影响曲线

仿真开始时，当滑移率在线性范围内逐渐增加，其纵向力随之增加。当滑移率增加到一定数值（图中大约为 3%）后曲线进入非线性区域，纵向力输出随滑移率继续增长。继续加大滑移率，纵向力将到达输出峰值，此峰值受轮胎与路面摩擦系数以及垂直载荷影响。当继续增大滑移率，输出将逐渐降低。对比刚度不

同轮胎，在相同滑移率时，高刚度轮胎纵向力输出明显大于小刚度轮胎。当纵向力输出最大值时，其纵向力输出大小与垂直载荷比值即为当前轮胎与路面最大附着系数<sup>[43]</sup>。公式如（2-13）所示。

$$\mu_{\max} = \frac{F_{x\max}}{F_z} \quad (2-13)$$

式中， $F_{x\max}$  为当前轮胎最大纵向力输出， $\mu_{\max}$  为当前最大附着系数。当垂直载荷不变，而最大纵向力更大时，表明当前轮胎与路面附着能力更高。同样当最大附着系数不变时，更高的垂直载荷可以提供更高的纵向力。不同垂直载荷下纵向力与垂直载荷之间关系如图（2-7）所示。

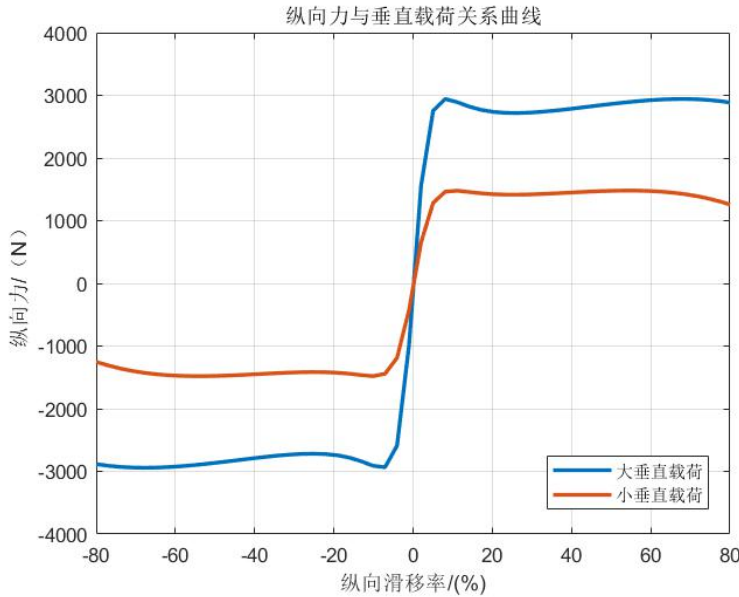


图 2-7 轮胎纵向力垂直载荷影响曲线

上图中大垂直载荷为 2000N，小垂直载荷为 1000N。可以看出大垂直载荷下轮胎纵向力输出能力明显增大，垂直载荷对于轮胎动力输出起到了重要作用。因此在实际机器人控制中，为了更好地控制驱动力大小，需要对垂直载荷进行分析与计算。

## （2）侧向力

在汽车行驶过程中，由于路面的倾斜、曲线行驶时的离心力等作用，车轮中心沿 Y 轴方向将作用有侧向力  $F_y$ ，相应地在地面上产生地面侧向反作用力，也称为侧偏力。侧向力是转向阻力矩的重要来源，为了分析机器人运动情况，必须对侧向力进行分析。根据轮胎模型理论，侧向力由轮胎侧向变形导致，而这种变形的大小由侧偏角进行表示，侧偏角如下图（2-8）所示。

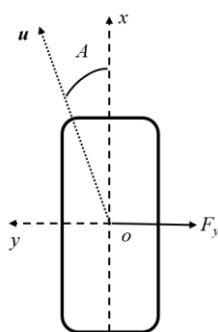


图 2-8 侧偏角

上图为轮胎俯视图，车轮平面与地平面的交线取为 X 轴，规定向前为正。Y 轴在地平面上，规定垂直于车轮前进方向时指向左边为正。u 为轮胎实际运行方向。由于滑动转向车辆不存在转向角，固 X 轴与轮胎实际运行方向 u 之间的夹角即为侧偏角 A。F<sub>y</sub> 为轮胎所受侧向力，侧向力方向与侧偏角相反。在侧偏角较小时侧偏角与侧向力同样存在线性关系，如式（2-13）所示。

$$F_y = C_a A \quad (2-14)$$

式中 C<sub>a</sub> 为侧偏刚度，侧向刚度与纵向刚度同样为轮胎固有属性。同样应用 MATLAB 编写魔术公式侧向力模块。经过仿真，侧向力侧偏角与侧向刚度之间关系如图（2-9）所示。

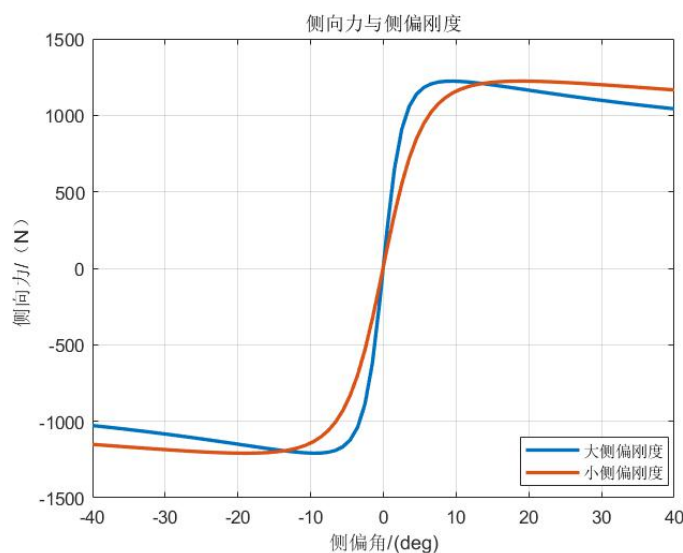


图 2-9 轮胎侧向力侧偏刚度影响曲线

与滑移率类似，当侧偏角较小时侧偏力与侧偏角呈线性关系，侧偏刚度 C<sub>a</sub> 为线性段斜率。当侧偏角继续增大时曲线进入非线性区，侧偏角继续增大至侧向

力峰值后，侧向力逐渐减小。对比不同侧偏刚度对侧向力的输出影响可以发现，其与纵向刚度对纵向力的影响有所区别。对于纵向刚度与纵向力之间的作用关系，高纵向刚度轮胎输出随滑移率增长快，同时滑移率趋于饱和时输出也明显高于低纵向刚度轮胎。而对于侧向刚度对侧向力输出的影响，高侧偏刚度轮胎侧向力输出随侧偏角增长快，但当侧偏角趋于饱和时，高侧偏刚度轮胎的侧向力输出下降明显，且最终输出小于低刚度轮胎。下面同样对垂直载荷对侧向力的影响进行分析，曲线如图（2-10）所示。

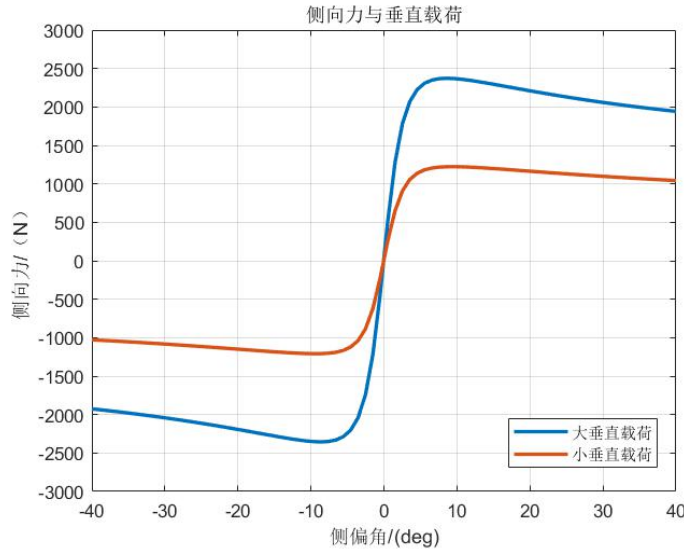


图 2-10 轮胎侧向力垂直载荷影响曲线

图（2-10）中大垂直载荷为 2000N，小垂直载荷为 1000N。可以看出与垂直载荷对纵向力影响一致，垂直载荷在纵向与侧向力中有重要影响<sup>[44]</sup>。

### 2.3 差速转向动力学

动力学旨在研究机器人受力与运动情况之间关系。在 2.1 节中我们研究了差速转向机器人运动特征，其不考虑受力情况，在 2.2 节中我们研究了轮胎动力学，轮胎动力学是轮式滑动转向机器人运动学与动力学之间的桥梁。有了前文的运动学以及轮胎动力学的分析我们就可以对机器人整体进行动力学分析。从机器人整体运行过程来看可以将动力学可分为两部分进行分析，分别为稳态动力学以及瞬态动力学。当机器人两侧动力输出不一致时机器人整体产生横摆力矩，机器人将绕自身 Z 轴进行横摆运动，此时横摆角加速度不为 0，其为瞬态动力学。当横摆阻力矩与机器人主动转向力矩平衡后，机器人将进入稳态动力学过程。本文涉及



的机器人工作环境主要在果园行间，为了满足运行平稳及作业精准等要求，机器人大多处于稳态工况下。因此，本节首先对机器人瞬态动力学进行简要分析后重点给出机器人稳态动力学方程，该动力学方程考虑了机器人处于坡道状态下的动力学特性。

首先对瞬态动力学分析，将左前轮、左后轮、右前轮、右后轮依次编号为 1、2、3、4。设机器人质量为  $M$ ，机器人纵向速度为  $v$  横向速度为  $u$  横摆角速度为  $w$ 。瞬态动力学分析如下图（2-11）所示。

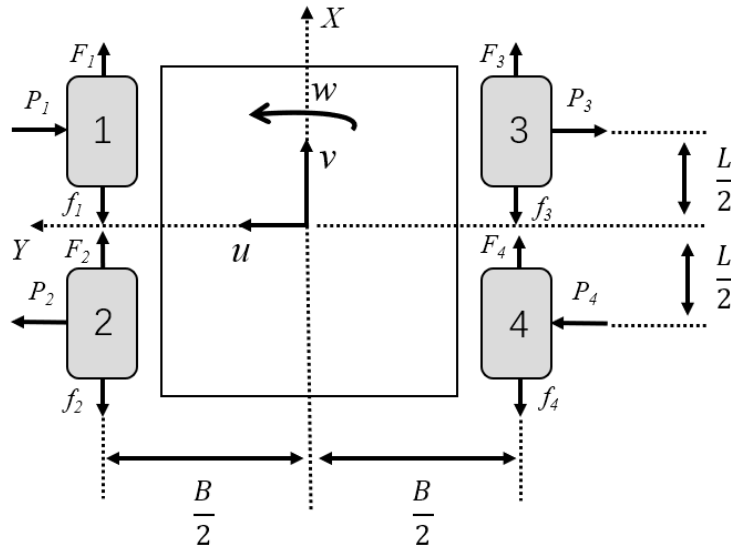


图 2-11 瞬态动力学

上图中  $F_i (i=1.2.3.4)$  为每个轮胎所受驱动力，该驱动力由电机产生，是需要通过稳态方程解算出的系统输入参数。 $P_i (i=1.2.3.4)$  为转弯时轮胎由侧偏角产生的侧向力。 $f_i (i=1.2.3.4)$  为每个轮胎所受到的滚动阻力。在车身坐标下，动力学方程如式（2-15）所示。

$$\begin{cases} M(\dot{v} - wu) = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 - f_1 - f_2 - f_3 - f_4 \\ M(\dot{u} - wv) = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \\ I_z \dot{w} = -\frac{B}{2}(F_1 - f_1) + \frac{B}{2}(F_2 - f_2) - \frac{B}{2}(F_3 - f_3) \\ \quad + \frac{B}{2}(F_4 - f_4) + \frac{L}{2}P_1 + \frac{L}{2}P_2 - \frac{L}{2}P_3 - \frac{L}{2}P_4 \end{cases} \quad (2-15)$$

上式中  $B$  为机器人轮距， $L$  为机器人轴距， $I_z$  为机器人  $Z$  轴转动惯量。瞬态动力学主要应用于机器人加减速等情况下，根据目标加速度计算驱动力。下面针



对果园行间自主运行情况，分析机器人处于坡道情况下的稳态动力学方程。整体分析如下图（2-12）所示。

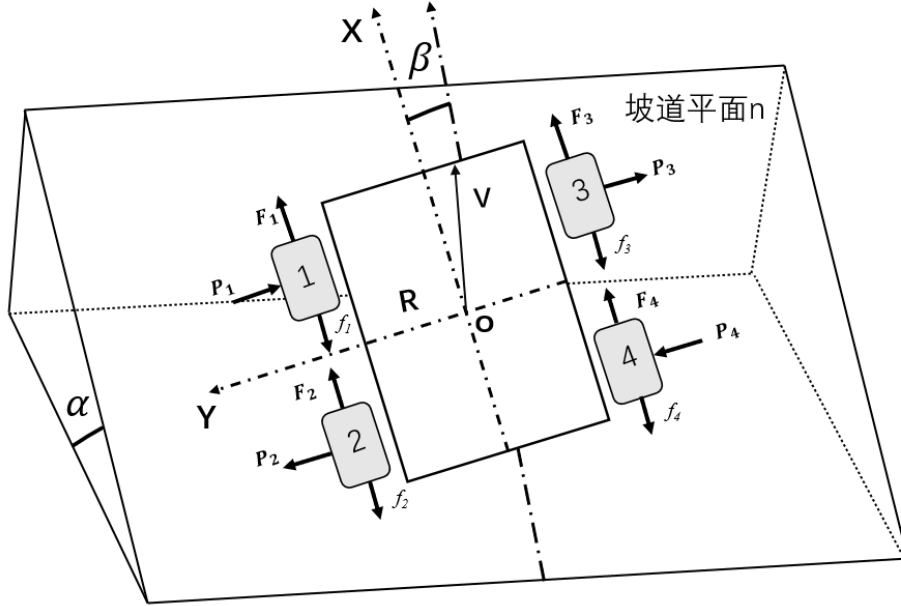


图 2-12 稳态动力学

上图中，机器人运行于坡道  $n$  上，坡道角度为  $\alpha$ ，机器人运行方向与坡道平面梯度方向夹角为  $\beta$ 。根据纵向力横向力及横摆力矩平衡列取平衡方程，其动力学方程如（2-16）所示。

$$\begin{cases} F_1 + F_2 + F_3 + F_4 - mg \sin \alpha \cos \beta - R_a = 0 \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + mg \sin \alpha \sin \beta = 0 \\ 0.5B(F_3 + F_4 - F_1 - F_2) - M_r = 0 \end{cases} \quad (2-16)$$

其中  $R_a$  为四轮滚动阻力之和， $M_r$  为侧向力以及滚动阻力构成的机器人横摆阻力矩，滚动阻力之和与横摆阻力矩的表达如公式（2-17）以及（2-18）所示。

$$R_a = \sum_{i=1}^4 f_{(i)} \quad (2-17)$$

$$M_r = 0.5D(P_1 + P_2 + P_3 + P_4) + 0.5B(f_1 + f_2 - f_3 - f_4) \quad (2-18)$$

四轮滑动转向可以将驱动力写成左右侧之和的形式,如式（2-19）所示。

$$\begin{cases} F_L = F_1 + F_2 \\ F_R = F_3 + F_4 \end{cases} \quad (2-19)$$

根据上式分析即可计算得坡道稳态转向时左右两侧驱动力需求，如式（2-20）

所示。

$$\begin{cases} F_L = 0.5(mg \sin \alpha \cos \beta + R_a - 2M_r / B) \\ F_R = 0.5(mg \sin \alpha \cos \beta + R_a + 2M_r / B) \end{cases} \quad (2-20)$$

式中  $F_L$  与  $F_R$  分别为机器人左侧与右侧驱动力需求。

## 2.4 本章小结

本章首先对机器人运动学进行了分析。分别讨论了理想状态下即不考虑滑移的运动学以及考虑了滑移影响的运动学。从分析中可以发现机器人质心与几何中心偏移距离影响了差速转向机器人前后轴侧滑速度，距离偏差越大，侧滑速度偏差越大。因此在对机器人进行机械设计时，应尽可能保证机器人质心位于几何中心位置。本小节最后，通过几何规律推导给出了各轮侧偏角与侧滑因子之间关系。其次，本章第二节分析了轮胎动力学的作用并给出了目前应用较多的魔术公式模型，以及 Fiala 模型的基本原理并对其应用进行了分析。再次，为说明纵向力侧向力与滑移率和侧偏角的关系以及其他因素对轮胎动力学数值大小的影响，单独对纵向力以及侧向力展开了分析。仿真实验表明，轮胎输出与轮胎各向刚度与垂直载荷有较大的关系，对机器人进行建模时，必须考虑垂直载荷对动力输出的影响。最后，通过滑动转向运动学以及轮胎动力学的铺垫，在本章最后一节中提出了轮式滑动转向机器人的瞬态动力学以及针对于果园环境的坡道稳态动力学方程。根据坡道稳态动力学方程即可求解机器人当前运行状态下所需动力输出，为后续动力输出优化做了准备工作。

### 第三章 轮式滑动机器人机械设计与仿真搭建

滑动转向机器人区别于阿克曼式以及全轮转向式机器人，不涉及转向机构，通过两侧车轮的差速运动实现转向。同时滑动转向还可以实现零半径转弯，这种转向方式使得机器人具有更好的操控性和机动性，可以轻松穿越狭窄的果树行间，避免果树的损伤。此外，滑动转向机器人还可以通过调整左右轮的转速来实现机器人的平稳转弯，减少了机器人在转弯时对土壤的损伤和压力。因此本课题选用滑动转向作为果园机器人的基本结构形式。

首节，根据机器人使用的基本情况进行了结构设计。设计主要目标为满足机器人通过性，零件互换性，低成本，以及户外防护需求。利用 SOLIDWORKS 对机器人进行整体设计，之后对重要零件通过 ANSYS 进行有限元强度校核。

次节，为了机器人动力选型以及后续控制算法仿真基于 ADAMS 多体动力学软件搭建了机器人动力学模型。该模型包括机器人本体，轮胎模型以及道路模型。通过该模型初步仿真了机器人运行所需驱动力，指导了动力系统选型。

最后一节，为满足控制仿真的需要，基于 SIMULINK 软件搭建了带有 FOC 磁场矢量控制算法的电机模型，并设定基本参数使其快速相应给定目标。利用该模型实现了动力学模型与控制模型的完整闭环。

#### 3.1 机器人机械结构设计

将机器人几何中心在地面的投影点作为原点建立坐标系，机器人整体形式如下图所示。

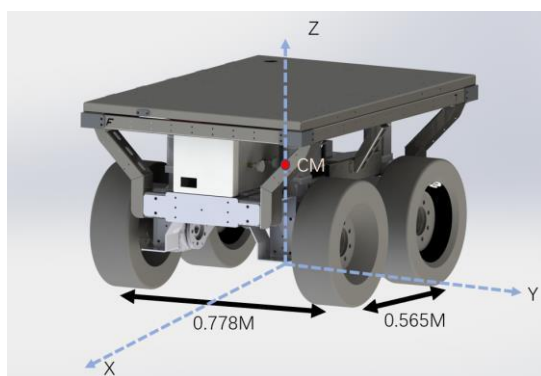


图 3-1 机器人结构图

本文设计的机器人主要应用于标准化种植果园进行植保、运输、采摘等工作。标准化果园成行种植，行与行之间趋于平行，两行间有 3 米左右可通行区域，行头空地空间较大。为了在行间实现灵活移动，机器人设计长宽不超过 1.5 米。同时滑动转向机器人轮距应大于轴距，并且根据路面条件不同，轮距与轴距之比数值不同。最终设计后机器人整体尺寸如表（3-1）所示。

表 3-1 机器人结构尺寸表

长/m	宽/m	高/m	轮距/m	轴距/m	轮距轴距比
1.27	0.928	0.677	0.778	0.565	1.38

为了提高底盘通过性，在设计中创新的使用了工业减速器，该减速器既承担了放大扭矩降低车速的作用又作为底盘重要支撑件从而省去单独设计支撑结构的成本，由于该减速器 90 度传动的原因，提高了机器人离地间隙，将易受损的电机放置在底盘上部，因此增加了机器人的户外通过能力。底盘轮组装配图如（3-2）左侧所示。

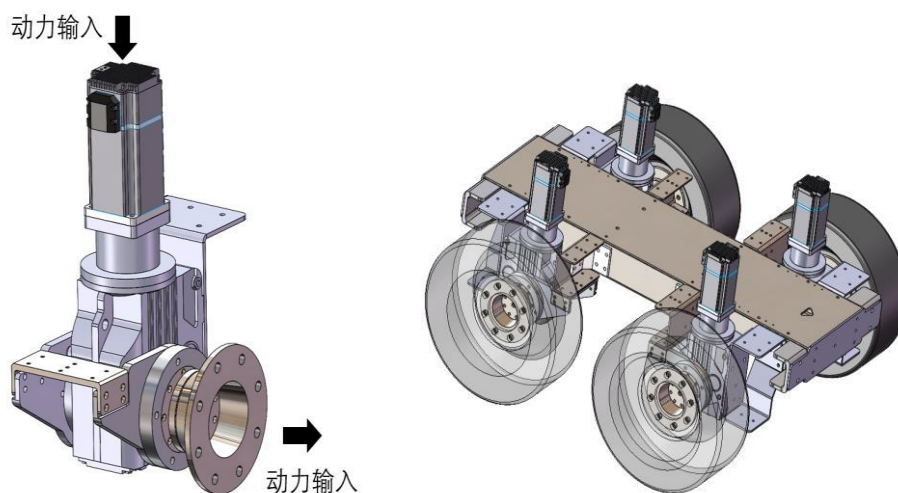


图 3-2 轮组与整车装配图

为将机器人质心位置与几何中心重合，在设计时将机器人设计为纵向横向基本完全对称的形式。底盘部分四个行走轮组镜像对称，零件互通互用。经过设计，轮组部分非标零件一共只有 32 个，增强了设备的互换性。为了满足户外防护的要求，减速器输入与输出端均增加了防水密封胶圈。机器人底盘采用刚性悬挂的设计，既降低了机器人成本也降低了机器人建模复杂程度。机器人底盘部分整体如（3-2）右侧所示。

根据最终设计，机器人接近角离去角达到 64 度最小离地间隙 282 毫米，满足了户外起伏路面的通行需求。考虑到滑动转向过程伴随的滑移率及侧偏角较

大,使得转向时轮胎承受侧向力较大,需提供的轮胎纵向力也相应增大,因此对轮胎磨损较为严重。根据轮胎动力学一节侧偏刚度对侧向力的影响分析可知,高侧偏刚度轮胎在侧偏角饱和情况下产生的侧向力小而更适用于滑动转向形式,考虑到实心轮胎的高侧向刚度以及耐磨性本文选用实心轮胎替代充气轮胎。图(3-3)为充气轮胎、实心胎、铁轮在不同侧偏角下侧向力输出对比图。从图中可以看出,轮胎刚度越大轮胎饱和侧向力越小,轮胎更容易进入滑移状态,从而机器人完成转向所需驱动力越小。

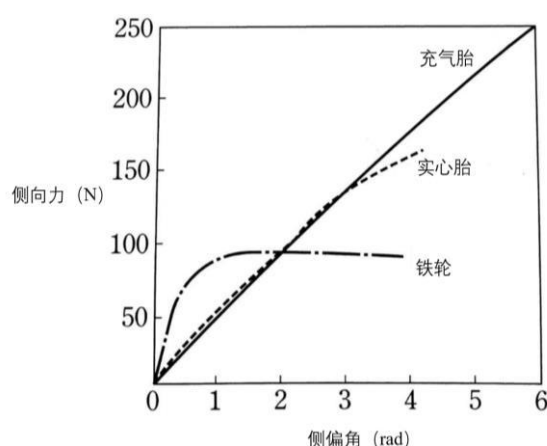


图 3-3 不同轮胎侧向力对比

受机器人特殊的滑动转向形式影响,机器人动力选型较为复杂。本文为了更加精确得到机器人运行中所需驱动力,对机器人整体进行动力学仿真。具体动力学建模过程在后一节中给出,本节只分析仿真结果。根据机械设计,机器人自重 300 千克,考虑后期负载 200 千克,总重共计 500 千克。机器人根据作业要求在果园行间运行线速度恒定为 0.3 米每秒。综合以上要求,设置实验条件为机器人在 2 度斜坡上以 0.3 米每秒的线速度做半径为 5 米的匀速圆周运动,从该运动过程中提取驱动力峰值作为驱动力要求。根据仿真实验结果,在上述条件下该机器人单轮最大驱动力为 630N。机器人选用的实心胎直径为 0.425 米,将轮胎所受纵向力换算为减速器轴上输出扭矩为 133.87 牛米,将轮胎线速度转换到转速为 13 转每分钟。依据以上参数指标对动力系统进行选型,最终结果如下表(3-2)所示。

表 3-2 电机参数表

电机功率/w	额定扭矩/nm	额定转速/rpm	电机转动惯量 /Ns <sup>2</sup> m
750	2.8	3000	0.0008

表 3-3 减速器参数表

减速比	额定输出扭矩/nm	额定输出转速/rpm
80	395	18

根据以上选型，减速器最大输出扭矩为 224 牛米，最大转速 18 转每分，均满足设计需求。

根据动力系统输出力矩以及机器人负载大小对机器人重要零件进行仿真校核。在该机器人中，转接筒是连接轮胎轮毂和减速器的关键零件，其承担传递减速器输出扭矩至轮胎以及在旋转过程中承受机器人重力引起的交变载荷，总体受力情况较为复杂。根据 GB/T 33582-2017《机械产品结构有限元力学分析通用规则》通过有限元方法对零件设计强度进行校核。转接筒材料为 304 不锈钢，其弹性模量为  $1.9 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ ，泊松比为 0.29，屈服强度为 206MPa。使用 Hypermesh 软件对该零件进行网格划分并进行局部优化，最终结果如图 (3-4) 左图所示，99.3% 的网格雅可比 (Jacobian) 大于 0.7。网格质量较低的部分位于在中部圆角的边缘处，由于该处不是应力集中区域，可以忽略其对计算产生的影响。92% 的网格长宽比小于 5，长宽比大于 5 的网格只出现在中部圆角的边缘处。整体网格的最大翘曲度为 0.00157，远小于一般 5 的要求，综上网格划分满足求解精度要求。

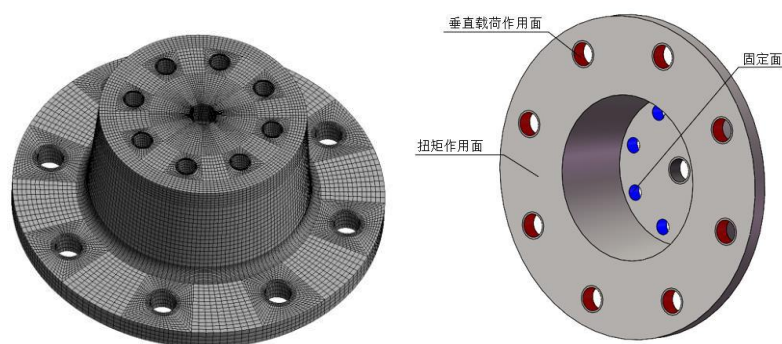


图 3-4 网格划分与载荷预设

依据圣维南原理，将边界条件做如下设置。将转接筒与车体的螺栓连接孔面设置为固定；在转接筒与轮毂的螺栓孔面施加垂直向下的、大小为 1000N 的载荷；在转接筒与轮毂连接面施加大小为 150NM 的扭矩。零件固定位置与载荷作用位置如图 (3-4) 右图所示。

设置边界条件后，通过 ANSYS 的 Mechanical 求解器进行计算，仿真结果如下。根据应力云图信息，如图 (3-5a) 所示，出现应力最大数值的具体位置为螺栓孔边缘，应力大小为 19.131MPa，其明显小于 304 材料屈服强度，且具有 3 倍



以上安全系数,可以满足抗冲击、抗疲劳的要求。零件应变云图如图(3-5b)所示,零件最大应变值为  $9.58 \times 10^{-5}$ ,其云图状态和应力云图基本一致。变形云图如图(3-5c)所示,最大变形量为  $0.09588 \text{ mm}$ ,零件整体变形较小。根据以上分析,机器人整体承受载荷最大,受力情况最复杂零件的强度性能以及抗冲击性能均能满足使用安全要求。

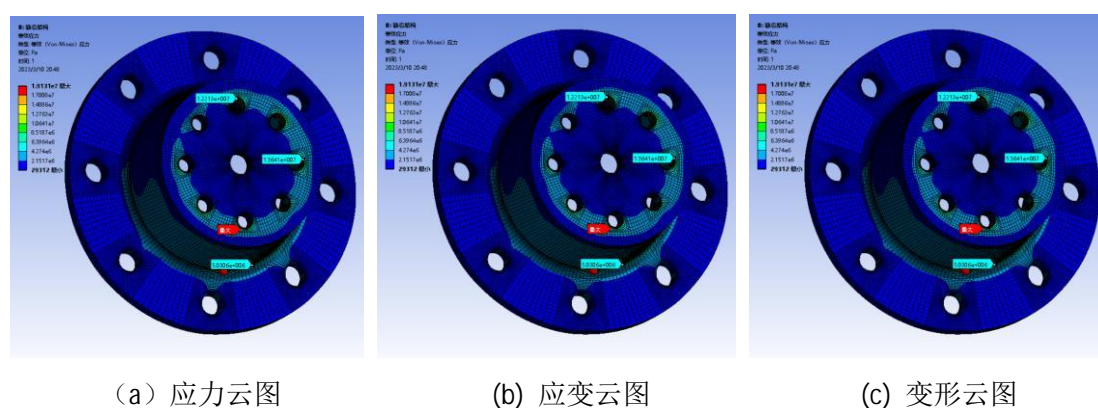


图 3-5

## 3.2 仿真搭建

多体动力学仿真模型的建立是机器人设计和控制的重要基础,通过建立机器人的多体动力学模型可以对机器人的运动学、动力学和控制系统进行分析以及优化设计。为了后续机器人参数估计、动力优化分配以及自主导航方法的研究以及验证,本节首先对机器人进行多体动力学仿真模型搭建。其次,为了在机器人运动过程中了解电机输出响应,避免电机过载等情况发生,利用 SIMULINK 搭建了基于磁场矢量控制技术的永磁同步电机仿真模型。将电机模型的输出转速接入多体动力学模型,将多体动力学模型的输出负载接入电机模型的输入实现了完整的机器人仿真系统闭环,从而可以更加真实全面的反应机器人实际运行情况。

### 3.2.1 多体动力学模型

ADAMS 软件是美国机械动力公司开发的虚拟样机分析软件。软件使用交互式图形环境和零件库、约束库、力库,创建完全参数化的机械系统模型,其求解器采用多刚体系统动力学理论中的拉格朗日方程方法,建立系统动力学方程,对虚拟机械系统进行静力学、运动学和动力学分析,输出位移、速度、加速度和反作用力曲线。ADAMS 软件的仿真可用于预测机械系统的性能、运动范围、碰撞检测、峰值载荷以及计算有限元的输入载荷等。本文建立的机器人动力学仿真模

型如图(3-6)所示。

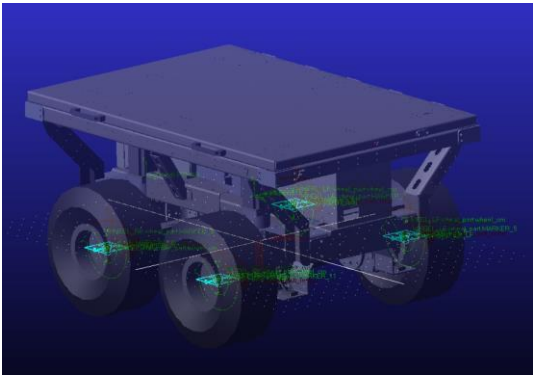


图 3-6 机器人动力学仿真模型

对于本文设计的差速转向轮式机器人，动力学建模主要包括三个部分第一部分是机器人本体建模，第二部分为轮胎模型建模，第三部分为路面建模。

对于机器人本体建模，由于本文中的机器人主要用于分析运动状态下的轮胎受力情况，车身其他部件不参与分析，因此将机器人本体视为完整刚体。通过 SOLIDWORKS 软件生成 x\_t 格式文件后直接导入 ADAMS VIEW 软件中。导入仿真软件中，设置重力、质心位置、机器人质量等参数即可。

第二部，轮胎模型搭建。ADAMS 中轮胎模型以轮胎文件形式存在其中，ADAMS 自带丰富的轮胎模型库，包括魔术公式、FIALA 模型、摩托专用轮胎模型等，轮胎文件如图(3-7)所示。

```
mdi_fiala - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
$-----MDI_HEADER
[MDI_HEADER]
FILE_TYPE = 'tir'
FILE_VERSION = 2.0
FILE_FORMAT = 'ASCII'
(COMMENTS)
(comment_string)
'Tire - XXXXXX'
'Pressure - XXXXXX'
'Test Date - XXXXXX'
'Test tire'
'New File Format v2.1'
$-----units
[UNITS]
LENGTH = 'mm'
FORCE = 'newton'
ANGLE = 'degree'
MASS = 'kg'
TIME = 'sec'
$-----model
[MODEL]
! use mode 1 2 11 12
! smoothing X X
! transient X X
!
PROPERTY_FILE_FORMAT = 'FIALA'r
USE_MODE = 2.0
$-----dimension
[DIMENSION]
UNLOADED_RADIUS = 212.5
WIDTH = 150
ASPECT_RATIO = 0.8
```

图 3-7 轮胎仿真文件



在轮胎动力学一节中分析了当前应用较多的 FIALA 轮胎动力学模型以及魔术公式模型，魔术公式由于需要提供较多的轮胎参数，导致其拟合工作复杂，有一定实际应用难度。而 FIALA 轮胎模型基于物理模型，模型应用只需要输入纵向刚度，侧向刚度，垂直刚度与阻尼等较少几个基本轮胎参数，模型内部通过物理变形机理求解受力，因此本文选用该轮胎模型作为后续算法开发的轮胎仿真模型。

第三部分为路面建模，路面模型同样以 txt 文件格式存在于仿真模型中。ADAMS 中自带了平整路面，典型障碍路面以及 3D 路面文件。由于本文机器人处于果园环境下，路面存在不规则起伏。固本文利用 MATLAB 编写了随机 3D 路面生成代码，其根据对路面不平度的要求生成路面节点参数，并导入 ADAMS 标准三维路谱模板文本中。

根据随机路面统计学规律，随机路面的路谱为平稳、遍历并且均值为零的高斯过程，因此可用三角级数进行模拟。谐波叠加法采用以离散谱逼近目标随机过程的模型，是一种离散化数值模拟路面的方法。我国沿用了国际标准协会文件 ISO/TC108/XC2N67 制定的路面不平的等级分类方法。该方法规定在空间频率  $[n_1, n_2]$  内，依照道路等级给出了功率谱密度  $G_q(n)$ ，路面功率谱密度如下式所示。

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left( \frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (3-1)$$

上式中  $n_0$  为参考空间频率，通常取值为  $0.1m^{-1}$ ， $G_q(n_0)$  为空间频率为  $n_0$  时的路面功率谱密度，称其为路面不平度系数。 $w$  为频率指数，决定了路面功率谱频率，通常取值为 2， $n$  为空间频率范围  $[n_1, n_2]$  某一频率。依据标准规定，路面不平度系数依据路面分为八级，如下表（3-4）所示。

表 3-4 路面等级表

路面等级	路面不平度系数几何平均值
A	16
B	64
C	256
D	1024
E	4096
F	16384
G	65536
H	262144

上表中，A 级路面最平坦，H 级路面最崎岖。根据学者对乡间土路、耕地路

面、草地路面的不平度调查,发现其符合国家 F 级路面情况。故本文利用正弦叠加法依据 F 级路面标准生成 ADAMS 可用路谱文件。生成的路面如图(3-8)所示。

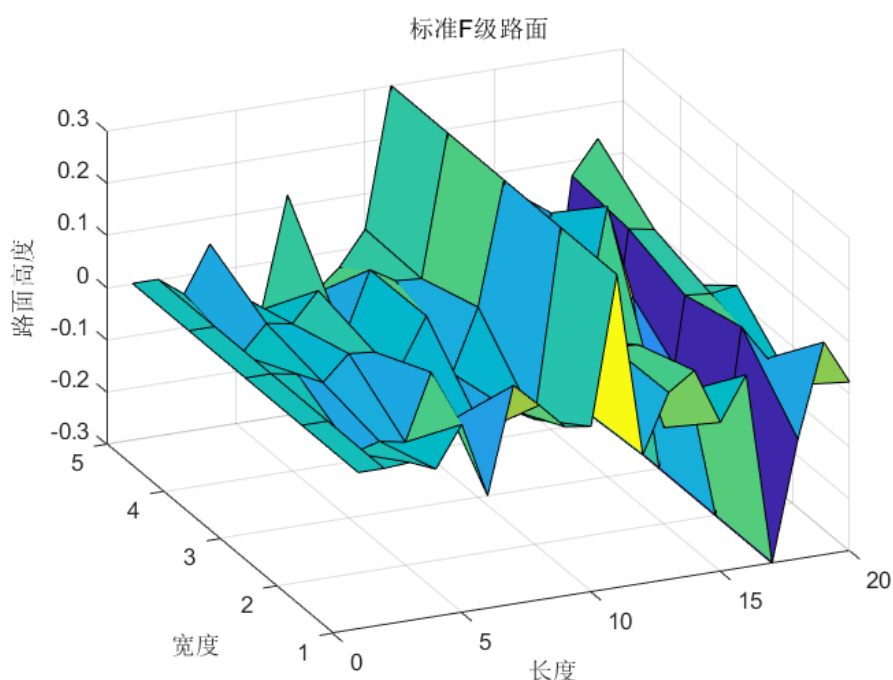


图 3-8 路面效果图

上图中,设置路面长度为 20 米,宽度 5 米,路面不平度为国家标准 F 级。同时考虑到路面可能存在的障碍情况,在长度方向 10 米以及 15 米处分别设置高度为 0.3 米的凸起障碍,以及 0.3 米的坑洼障碍。将该路谱坐标信息导入 ADAMS 标准路谱文档中即可生成仿真路面。

至此,多体动力学模型全部搭建完成,为后续机器人仿真与控制算法开发提供了基础。

### 3.2.2 电机仿真模型

电机是机器人运行的基本动力原件,其响应基本能够反映出机器人行驶时的性能与效率。本文中机器人采用 750W 直流无刷伺服电机并配有一体式伺服器,通过伺服器可以读取当前电机电流、力矩、转速等基本参数信息。随着电机应用的兴起,电机控制手段也得到较好发展,本文所选用伺服电机为使电机输出力矩更加精准稳定,在伺服器内包含了磁场矢量控制算法,后文简称 FOC 算法。为后续进行机器人仿真与控制方法验证,本节利用 SIMULINK 仿真软件,搭建了基于 FOC 控制方法的永磁同步电机仿真模型,示意图如(3-9)所示。

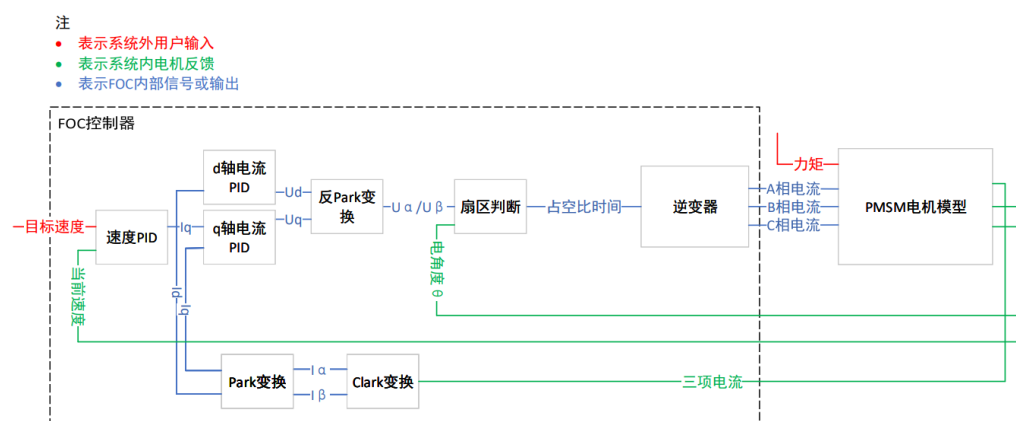


图 3-9 FOC 控制方法

FOC 控制方法与其他电机控制方法最大不同在于增加了对电机电流进行采样环节，同时需要精确估计转子角度。该控制方法具体流程如下，首先通过传感器或者观测算法，采集得到三相电流  $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$ ，电角度  $\theta$ ，电机转速  $v$ 。接着将采集的三相电流  $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$  进行坐标转换，通过 clark 变换从三相静止坐标系转换两相静止直角坐标系，再通过 park 变换从两相静止直角坐标系转换到两相旋转直角坐标系，得到  $I_d$ 、 $I_q$  电流。同时，利用反馈的电机转速与设定的目标速度进行比较，得到控制偏差，将偏差经过比例、积分、微分处理得到控制量，输出目标  $q$  轴电流。然后对  $d$  轴与  $q$  轴分别做 PID 计算，利用当前的  $I_q$  电流与速度环 PID 输出值进行比较，得到控制偏差，将偏差处理得到控制量，输出  $q$  轴的目标电压，同理利用当前的  $I_q$  电流与 0 进行比较，输出  $d$  轴的目标电压。把电流环 PID 输出的  $d$  轴与  $q$  轴目标电压，先后经过 park 反变换、clark 反变换，从两相旋转直角坐标系转换到三相静止坐标系，得到三相目标电压  $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 。最终通过转换坐标系后得到的三相电压，计算得到三相电压所需的占空比，并控制逆变器输出三相电流，实现电机的精确控制。

本文根据上述原理,基于 SIMULINK 搭建了仿真模型。FOC 算法仿真中除了基本的模型搭建任务外, PID 参数整定尤为重要, 其决定了电机的响应特性以及控制精度。经过仿真搭建以及参数调试后对该模型进行仿真测试, 仿真设置以阶梯形式对电机模型输入目标转速及负载, 测试时长 10 秒。仿真过程中包含低速低负载、低速高负载、高速高负载、高速低负载以及静止低负载这五类典型情况。电机目标转速与实际转速情况如图 (3-11) 所示, 图 (3-10) 为电机负载, 图 (3-12) 及图 (3-13) 分别为  $d$  轴、 $q$  轴电流响应曲线。

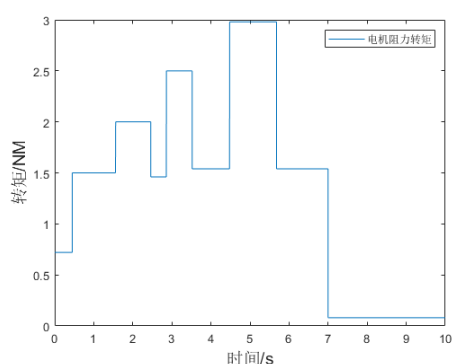


图 3-10 电机实时负载图

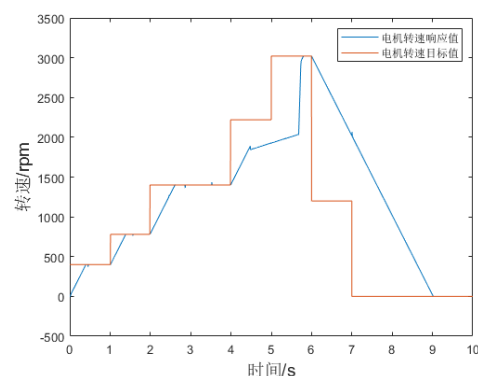


图 3-11 转速控制效果

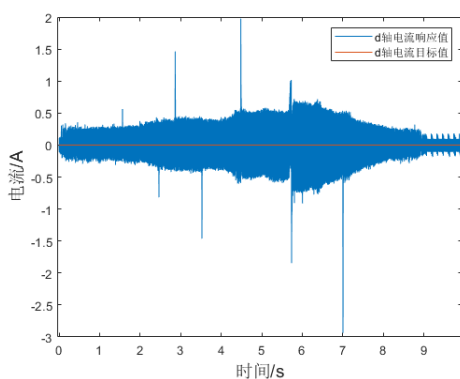


图 3-12 d 轴电流控制效果

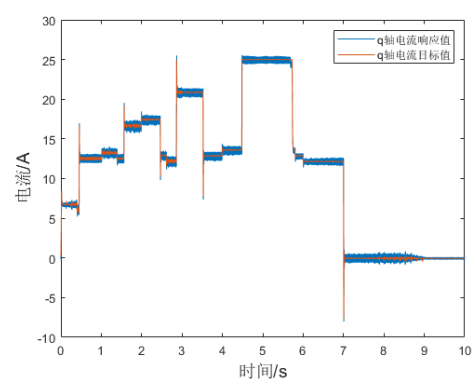


图 3-13 q 轴电流控制效果

观察上图中仿真实验结果。在速度响应中，无论是在低转速低扭矩还是在高转速低扭矩的各种工况中都不存在大过冲情况，超调量始终低于 0.75%。在 FOC 算法中为将电机输出电流控制在合理范围内避免电机损坏，过热等情况，对电机加速度设定了阈值，因此在本实验中电机最大加速度约为 16.7 转每平方每秒。当电机负载达到额定扭矩 3 牛米时，电机的最大加速度只有 5 转每平方秒，且与目标速度存在稳态误差。观察实验结果中 d,q 轴电流情况，发现无论电机处于何种工况下 d,q 轴均能较好跟踪给定目标，且当负载变化时 d 轴电流始终保持在 0 安附近震荡，满足了 FOC 算法控制要求。根据实验结果，仿真算法可以满足后续控制方法开发需求。

### 3.3 本章小结

本章首节，根据果园实际需求进行机器人机械设计，通过模块化设计使车体结构对称，利于互换性以及运行性能。之后对动力需求进行仿真分析，根据仿真

结果完成了电机与减速器选型。同时给出了滑移转向机器人选择实心轮胎的依据。本节最后，对机器人中受力最复杂的零件利用有限元仿真工具进行检验，检验结果表明该零件具有三倍以上安全系数，满足适用需求。

为了后续控制方法研究，本章第二节对机器人仿真模型进行搭建。机器人动力学模型基于 ADAMS 多体动力学分析软件进行搭建。首先将 SOLIDWORKS 生成的机器人三维模型导入仿真软件中，添加约束，质量位置等信息几何。其次配置了基于 FIALA 模型的轮胎模型。再次，基于国家路面不平度标准利用正弦波叠加法建立了符合果园环境的 F 等级路面。最后利用 SIMULINK 搭建了基于 FOC 控制方法的永磁同步电机控制模型，并通过仿真实验，验证了电机在不同工况下的响应能力，结果满足后续控制仿真的要求。

至此，本章完成了对果园轮式滑动转向机器人的基础结构设计以及机器人控制方法仿真环境搭建，为后续机器人参数估计、驱动力分配、轨迹跟踪等研究做好了准备工作。

## 第四章 垂直载荷估计与驱动力优化分配方法

上一章完成了机器人的机械设计与仿真准备工作，本章依靠理论分析与仿真验证对果园环境下滑动转向机器人控制问题展开分析与研究。本章主要旨在解决果园环境下机器人轮胎垂直载荷及侧向力估计，并且根据第二章第三节中提出的机器人坡道稳态动力学方程进行驱动力需求解算，最后通过优化手段将驱动力进行合理分配。

### 4.1 意义与方法

轮式滑动转向机器人的转向主要依靠轮胎与路面之间的滑移运动，但滑移过程中机器人的动力学参数变化范围较大。目前，滑动转向在室内环境下应用广泛，相关控制的方法研究也较为全面。但当涉及到户外情况时，由于轮胎受路面起伏影响以及坡道路面影响，驱动力控制与分配就要考虑到环境以及机器人运动状态对轮胎的影响。此时如果缺少垂直载荷、侧向力等重要轮胎动力学，便难以实现机器人运动与姿态的高精度控制要求。因此轮胎动力学参数的实时估计对提高机器人的运行精度具有重要意义。

因此本章重点研究了果园环境下的滑动转向机器人轮胎实时垂直载荷以及侧向力实时估计方法。同时提出了基于第二章第三节所分析的坡道稳态动力学及以上估计参数的驱动力优化分配方法。首先，本章提出了一种基于陀螺仪的四轮垂直载荷实时估计方法，通过该方法可实时计算各轮胎垂直载荷。其次，为解算动力学参数，本文引入了轮胎动力学模型并将该模型进行了简化使其适用于刚性悬架的轮式滑动转向机器人。该轮胎动力学模型可根据当前机器人运行情况实时计算用于轮胎驱动力解算的轮胎侧向力。再次，提出了轮式滑动转向机器人坡道稳态转向动力学模型，通过坡道稳态动力学模型可以估计当前姿态下同侧轮胎驱动力需求总和。最后，提出了同侧轮胎最优驱动力估计方法，从而降低轮胎利用率并提高轮胎附着裕量，增加运行稳定性。本章提出的基于垂直载荷的轮胎动力输出优化方法主要通过垂直载荷计算、侧向力及滚动阻力计算、驱动力需求计算、驱动力优化五步实现，整体技术路线如下图（4-1）所示。

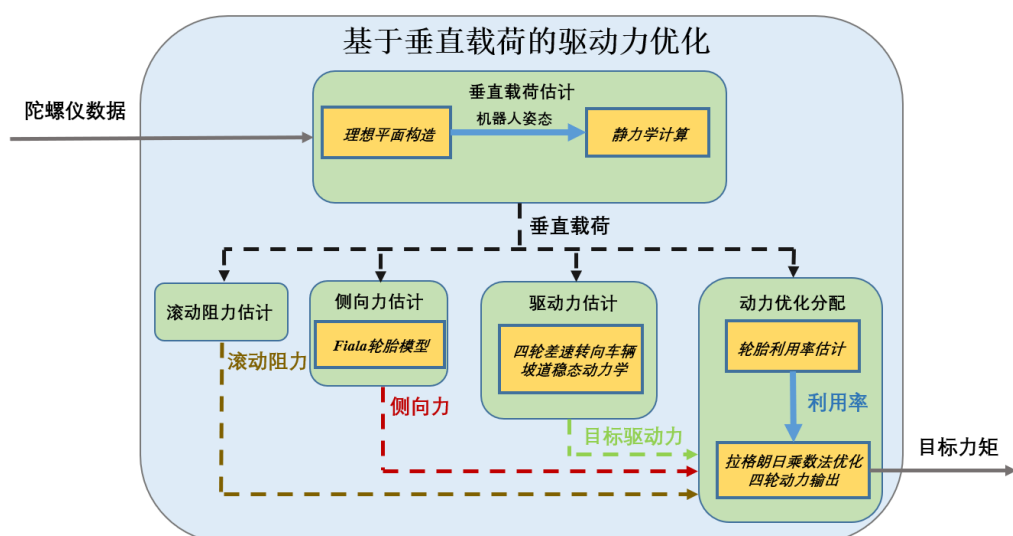


图 4-1 整体方法示意图

如图（4-1）所示，首先通过机器人的质量、质心位置、轮距与轴距参数以及机器人当前姿态计算机器人各轮垂直载荷。然后，通过滚动阻力估计模型与侧向力估计模型计算轮胎侧向力以及滚动阻力，从而估计所需轮胎纵向力。对于侧向力的估计本文引入了基于物理描述的 Fiala 轮胎动力学模型，该轮胎模型需要的参数较少，在大半径转弯条件下准确性高，适用于本文研究对象。得到各个轮胎的侧向力及滚动阻力后，根据本文提出的坡道稳态转向动力学对驱动力需求进行估计。驱动力优化部分，以单侧驱动力需求作为约束条件，以单侧两轮胎的利用率之和构造代价函数，通过拉格朗日乘数法评估当前同侧车轮的最优驱动力分配，以提高机器人控制精度。

## 4.2 机器人垂直载荷估计

本章研究使用的机器人整体形式即为第二章所设计的样式，结构简图如图（4-2）所示。

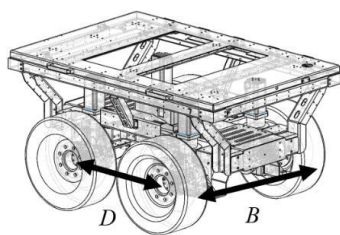


图 4-2 机器人结构示意图

图（4-2）中  $D$  为机器人轴距， $B$  为机器人轮距。机器人采用几何中心对称设计，经过实测其重心与几何中心偏差较小。差速转向过程滑移率及侧偏角较大，使得轮胎承受侧向力较大，需提供更大驱动力完成转向动作。由于实心胎在侧偏角饱和情况下产生的侧向力小而更适用于滑动转向形式，固本文选用实心轮胎替代充气轮胎。因实心轮胎刚性大且机器人采用低自由度的刚性悬架设计，当路面有激励输入轮胎时，轮胎与车身无相对运动，可将机器人整体作为刚体分析。因此，机器人动力学建模过程可忽略悬架对车身运动的影响，从而降低了机器人运动过程的模型复杂度。机器人为独立四驱运动模式，可根据电机反馈的转速、扭矩评估轮胎附着情况，给出各轮最优驱动力估计。

垂直载荷越高可获得更高轮胎附着力，该参数是本文方法的基础。当机器人处于平整路面时，机器人四轮垂直载荷恒定；而果园环境下机器人垂直载荷随路面起伏变化。为估计各轮胎垂直载荷，需建立对机器人进行静力学分析的标准平面，并计算机器人与该平面的相对位姿。本文研究的机器人整体为刚体，任意时刻下机器人的四轮接地点都同处于一个平面内，可依靠四轮接地点构造平面。该平面可间接表示机器人当前位姿。本文提出的垂直载荷算法只与机器人姿态有关，与实际路面情况无关，固称该平面为理想平面。将理想平面看作是机器人当前行驶的路面，从而将机器人的空间位姿从欧拉角表示法转化为由坡道角  $\alpha$  以及机器人相对于坡道梯度方向的偏航角  $\beta$  表示。通过该姿态表示方法理想化的假设机器人处于平整坡道路面上，这一假设对机器人的静力学分析提供了支持。整体位姿表示如下图（4-3）所示。

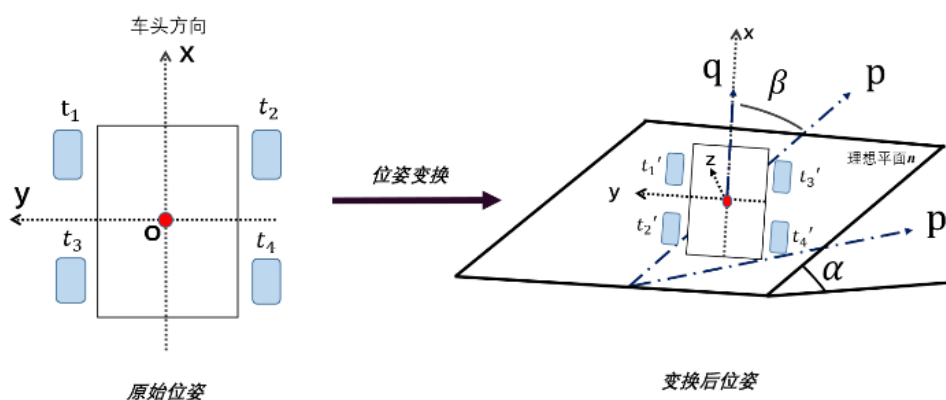


图 4-3 机器人位姿变换

假设车辆重心与几何中心完全重合，机器人质量为  $m$ 。以机器人自身几何中心  $O$  为原点，车头方向为  $X$  轴。按照右手定则建立坐标系。则此时四轮接地点原始坐标矩阵如公式（4-1）所示。



$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D/2 & B/2 & 0 \\ -D/2 & B/2 & 0 \\ D/2 & -B/2 & 0 \\ -D/2 & -B/2 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

式中  $t_1$ ——左前轮接地坐标点

$t_2$ ——左后轮接地坐标点

$t_3$ ——右前轮接地坐标点

$t_4$ ——右后轮接地坐标点

$D$ ——机器人轴距

$B$ ——机器人轮距

机器人空间位姿由陀螺仪输出的欧拉角表示。通过欧拉角可以得到机器人 X、Y、Z 轴的旋转矩阵，如公式（4-2）、（4-3）、（4-4）所示。上述三个公式按照欧拉角输出顺序依次左乘得到轮胎的空间旋转矩阵 T。

$$\mathbf{W}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

$$\mathbf{W}_y = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

$$\mathbf{W}_z = \begin{bmatrix} \cos \omega & \sin \omega & 0 \\ -\sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

式中  $\varphi$ ——机器人横滚角

$\gamma$ ——机器人俯仰角

$\omega$ ——机器人航向角

$\mathbf{W}_x$ ——X 轴旋转矩阵

$\mathbf{W}_y$ ——Y 轴旋转矩阵

$\mathbf{W}_z$ ——Z 轴旋转矩阵

将四轮原始接地点坐标与旋转矩阵 T 相乘后得到当前姿态下的机器人四轮接地点坐标。旋转后的四轮坐标分别为  $t'_1$ 、 $t'_2$ 、 $t'_3$ 、 $t'_4$  如公式（4-5）所示。变换后的机器人空间位姿如图（4-3）右侧所示。

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{bmatrix} = T^* \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

四轮空间坐标已知后，通过求解平面方程系数便得到了完整的理想坡面方程，坡面方程如公式（4-6）所示。

$$Z = aX + bY + c \quad (4-6)$$

式中  $a$ 、 $b$ 、 $c$ ——待求解的平面方程系数

通过对理想坡面方程求取偏导得到平面的梯度方向设为向量  $\mathbf{p}$ ，梯度向量在平地的投影向量为  $\mathbf{p}'$ ，车头朝向向量为  $\mathbf{q}$ 。通过余弦定理可以分别求出车头与梯度方向之间夹角  $\beta$ （坡道偏航角）以及坡道与地面之间夹角  $\alpha$ （坡道角）。由此，依靠该理想平面可对机器人进行静力学分析，从而进行垂直载荷计算。考虑轮式差速机器人在坡道运行过程，可将机器人与坡道的关系分为四种状态，如下表（4-1）所示

表 4-1 机器人坡道状态表

	状态一	状态二	状态三	状态四
状态位姿	上坡偏左	上坡偏右	下坡偏左	下坡偏右
坡道角/ $^\circ$	大于 0	大于 0	小于 0	小于 0
坡道偏航角/ $^\circ$	大于 0	小于 0	大于 0	小于 0

先以状态一为例进行分析。将机器人整体看作质点考虑在坡面下的受力情况，假设坡道角为  $\alpha$  坡道偏航角为  $\beta$  并且  $\alpha$  与  $\beta$  均大于 0 度。机器人在坡面下受到的重力可分解为垂直坡道平面  $\mathbf{n}$  向内的分力  $F$  以及沿坡道梯度相反方向的分力  $F'$ ，如图（4-4）所示。

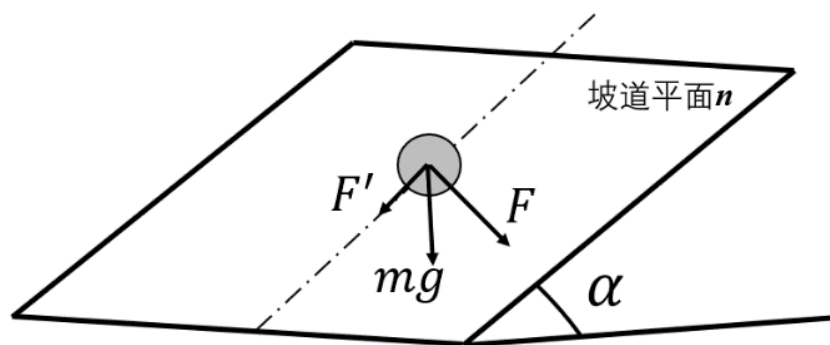


图 4-4 机器人整体坡道受力分解示意图

上图中  $F$  为重力分解后垂直坡面向内的应力，其大小为  $mg \cos \alpha$ ，其产生的反作用力是垂直载荷的主要组成部分称其主应力。 $F'$  称其为分应力，大小为  $mg \sin \alpha$ 。单独对主应力进行分析，主应力  $F$  在机器人四个轮胎之间的分配关系取决于机器人自身的重心位置。因本文假设了重心位于几何中心且机器人几何中心对称，固四轮所受主应力产生的垂直载荷相等。设左前轮、左后轮、右前轮、右后轮受主应力影响所产生垂直载荷为  $F_{lf}$ 、 $F_{lb}$ 、 $F_{rf}$ 、 $F_{rb}$  其数值大小如式 (4-7) 所示。从公式中可以看出  $F_{lf}$ 、 $F_{lb}$ 、 $F_{rf}$ 、 $F_{rb}$  只与坡道角有关与坡道偏航角无关。

$$F_{lf} = F_{lb} = F_{rf} = F_{rb} = \frac{mg \cos(\alpha)}{4} \quad (4-7)$$

式中  $F_{lf}$ ——左前轮基础垂直载荷

$F_{lb}$  ——左后轮基础垂直载荷

$F_{rf}$  ——右前轮基础垂直载荷

$F_{rb}$ ——右后轮基础垂直载荷

$m$ ——机器人质量

从式(4-7)可知， $F_{lf}$ 、 $F_{lb}$ 、 $F_{rf}$ 、 $F_{rb}$  只与坡道角有关而与坡道偏航角无关。对重力沿斜面分力对四轮垂直载荷的影响进行分析如图 (4-5) 所示。

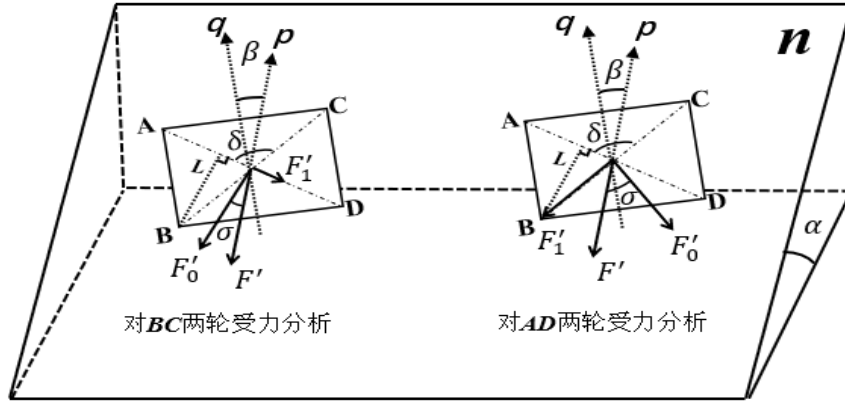


图 4-5 状态一各轮受力分析示意图

首先正视于坡道平面  $n$ ，设机器人质心距坡道平面高度为  $h$  设左前轮、左后轮、右前轮、右后轮的接地点分别为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 。连接对角轮做直线  $AD$ 、 $CB$ 。过  $B$  点做  $AD$  垂线，过  $C$  点做  $AD$  垂线，两线段长度均为  $L$ 。 $AD$  与  $CB$  之间夹角为对角轮连线夹角，设为  $\delta$ 。

首先对状态一的左后轮与右前轮进行受力分析。将  $F'$  分解为沿  $AD$  方向的分力  $F'_1$  垂直于  $AD$  连线向下的分力  $F'_0$  称  $F'_0$  为主分力  $F'_1$  为辅分力。设  $F'_0$  与  $F'$  之间夹

角为  $\sigma$ 。同理可对左前轮与右后轮进行分析。

由图 (4-5) 左侧受力分解可知, 主分力将会对轴 AD 作用产生力矩  $M_{BC}$ , B、C 两点将会产生等大反向的作用力, 绝对值大小为  $F_{BC}$ 。  $F_{BC}$  与力矩  $M_{BC}$  使 AD 轴力矩平衡。而辅分力不对 B、C 两点产生影响。力矩  $M_{BC}$  具体计算如下。

$$\sigma = \frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2} - \beta \quad (4-8)$$

$$F'_0 = F' \cos \sigma \quad (4-9)$$

$$M_{BC} = F'_0 h \quad (4-10)$$

$$M_{BC} = 2|F_{BC}|L \quad (4-11)$$

根据公式(12)可以得到反作用力  $F_{BC}$ 。

$$F_{BC} = \left| \frac{M_{BC}}{2L} \right| \quad (4-12)$$

将基础应力与该反作用力进行叠加便可得到左后轮和右前轮的垂直载荷, 设左后轮和右前轮的垂直载荷分别为  $F_{LB}$  与  $F_{RF}$ 。计算公式如 (4-13) (4-14) 所示。

$$F_{LB} = F_{LF} + F_{BC} \quad (4-13)$$

$$F_{RF} = F_{rf} - F_{BC} \quad (4-14)$$

计算得到左后轮以及右前轮垂直载荷后, 对左前轮以及右后轮进行分析。其受力分解如图 (4-5) 右侧所示。其计算过程与左后轮及右前轮一致, 对 AD 轴进行力矩平衡计算时只需重新解算主分力与分应力之间的夹角  $\sigma$ 。其计算公式如式 (4-15) 所示。

$$\sigma = \frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2} + \beta \quad (4-15)$$

下面给出在状态一下差速轮式机器人四轮垂直载荷计算公式。

$$\begin{cases} F_{LF} = mg \cos \alpha - \frac{mgh \sin \alpha}{2L} \cos(\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2} + \beta) \\ F_{LB} = mg \cos \alpha + \frac{mgh \sin \alpha}{2L} \cos(\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2} - \beta) \\ F_{RF} = mg \cos \alpha - \frac{mgh \sin \alpha}{2L} \cos(\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2} - \beta) \\ F_{RB} = mg \cos \alpha + \frac{mgh \sin \alpha}{2L} \cos(\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2} + \beta) \end{cases} \quad (4-16)$$

下面用相同方法对状态二进行分析。状态二为上坡偏右，设状态一与状态二坡道角相等，坡道偏航角大小相等方向相反，如式 18 所示。整体受力分解如图 4 所示，各轮受力分解如图（4-6）所示。

$$\beta = -\beta' \quad (4-17)$$

式中—— $\beta'$ 为状态二坡道偏航角

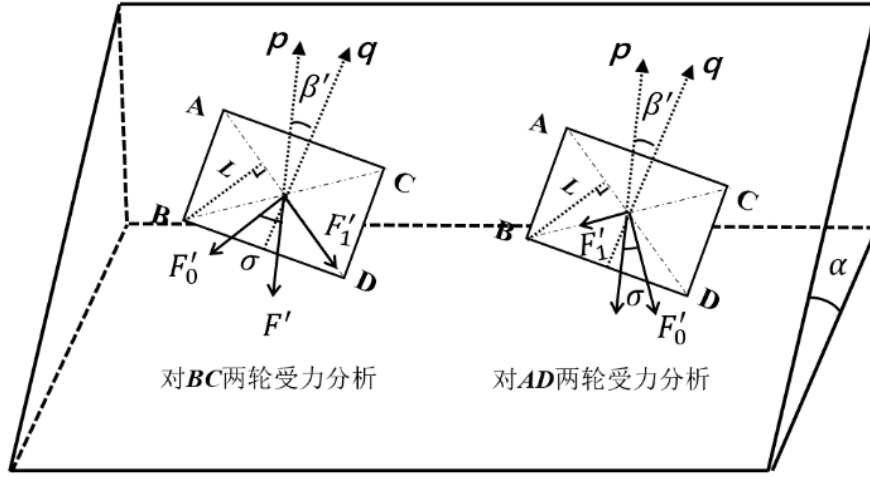


图 4-6 状态二各轮受力分析示意图

对状态一的解算方法与对状态二的解算相同，下面直接给出状态二的四轮垂直载荷计算公式如公式（4-18）所示。状态二受力分解如图（4-6）所示。

$$\begin{cases} F_{LF} = mg \cos \alpha - \frac{mgh \sin \alpha}{2L} \cos(\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2} + \beta') \\ F_{LB} = mg \cos \alpha + \frac{mgh \sin \alpha}{2L} \cos(\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2} - \beta') \\ F_{RF} = mg \cos \alpha - \frac{mgh \sin \alpha}{2L} \cos(\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2} - \beta') \\ F_{LF} = mg \cos \alpha + \frac{mgh \sin \alpha}{2L} \cos(\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2} + \beta') \end{cases} \quad (4-18)$$

根据公式（4-16）以及（4-18）可以发现，当机器人处于坡道状态下并且坡道角相同，坡道偏航角相反时，左右两侧车轮的垂直载荷具有对称性。同理可证当俯仰角大小相同方向相反时，其依然存在对称性。下面对机器人处于坡道四种状态下的对称性进行总结。假设在状态一下，左前轮、左后轮、右前轮、右后轮的垂直载荷分别为  $F_a$ 、 $F_b$ 、 $F_c$ 、 $F_d$ ，坡道角为  $\alpha'$  ( $\alpha' > 0$ ) 坡道偏航角为  $\beta'$  ( $\beta' > 0$ )，则机器人处于坡道下的对称性如表（4-2）所示。

表 4-2 坡道下机器人各轮垂直载荷对称性示意

	坡道角	坡道偏航角	左前轮垂直 载荷	左后轮垂直 载荷	右前轮垂直 载荷	右后轮垂 直载荷
状态一	$\alpha'$	$\beta'$	$F_a$	$F_b$	$F_c$	$F_d$
状态二	$-\alpha'$	$\beta'$	$F_c$	$F_d$	$F_a$	$F_b$
状态三	$\alpha'$	$-\beta'$	$F_d$	$F_c$	$F_b$	$F_a$
状态四	$-\alpha'$	$-\beta'$	$F_b$	$F_a$	$F_d$	$F_c$

基于对称性，在实际算法中就可省略对机器人坡道状态的判断。可将所有情况按照状态一进行解算。计算得到状态一下各轮垂直载荷后，根据机器人与坡道的相对姿态进行垂直载荷分配即可。

### 4.3 驱动力优化分配

在果园环境下行驶过程中，由于路面摩擦系数低以及路面起伏不定等原因，轮式机器人容易产生单轮滑移率过大、负载过大、机器人整体侧滑等现象，导致姿态控制难度增大。根据轮胎动力学原理，应当根据轮胎垂直载荷实时调整驱动力分配，将驱动力分配给具有高附着能力的轮胎。随垂直载荷动态分配左右两侧驱动力可以更好的利用轮胎与地面的动力学特性，提高机器人行驶过程中的稳定性。第二章第三节中分析了坡道稳态动力学转向动力学，并通过该动力学方程给出了左右两侧驱动力条件如式所示。在驱动力条件中， $R_a$  与  $M_r$  分别为滚动阻力之和与转向阻力矩。但在该节中没有涉及滚动阻力与侧向力求解，下面对其进行分析。

轮胎滚动阻力由滚动阻力系数与垂直载荷共同决定，设路面滚动阻力系数为  $\mu_r$ ，轮胎垂直在载荷为  $F_z$ ，各轮胎垂直载荷通过上文提出的垂直载荷计算方法得到，则滚动阻力如公式（4-19）所示。

$$f = \mu_r F_z \quad (4-19)$$

由于轮胎结构复杂，其纵向力与侧向力输出呈现非线性趋势，因此选用轮胎模型进行求解。本文选用 Fiala 轮胎模型对侧向力进行求解，该模型只需要较少参数就可以对纵向力、侧向力、回正力矩进行解算。由于滑移转向车辆一般采用为刚性悬架且倾角为 0 度，在进行计算时不考虑回正力矩以及倾角等影响，因此本文将原本 Fiala 模型进行精简，简化为适用于滑移转向建模的侧向力模型。简化后的模型侧向力解算公式如下所示。

$$k_\alpha = \sqrt{s^2 + \tan^2 \alpha'} \quad (4-20)$$

$$\mu = \mu_s - (\mu_s - \mu_k)k_\alpha \quad (4-21)$$

$$\alpha'_c = \arctan\left(\frac{3\mu F_z}{C_\alpha}\right) \quad (4-22)$$

$$\tau = 1 - \frac{C_\alpha |\tan \alpha'|}{3\mu F_z} \quad (4-23)$$

$$F_y = \begin{cases} -\tanh(4\alpha'_c)\mu F_z & |\alpha'| > \alpha'_c \\ -\tanh(4\alpha'_c)\mu F_z(1-\tau^3) & |\alpha'| \leq \alpha'_c \end{cases} \quad (4-24)$$

式中  $s$ ——滑移率

$\alpha'$ ——侧偏角

$k_\alpha$ ——综合滑移系数

$\mu_s$ ——静摩擦系数

$\mu_k$ ——滑动摩擦系数

$\mu$ ——实时摩擦系数

$C_\alpha$ ——轮胎侧偏刚度

$\alpha'_c$ ——临界侧偏角

$\tau$ ——侧偏系数

根据上述公式，机器人在坡道稳态转向过程中，通过轮胎的滑移率、侧偏角以及垂直载荷便可以对各个轮胎的侧向力进行评估。

利用 Fiala 轮胎动力学模型，由公式（4-21）可求解当前行驶条件下综合摩擦系数  $\mu$ 。摩擦系数反映了当前轮胎的最大附着力与垂直载荷的关系，公式如（4-25）所示。

$$F_{MAX} = \mu F_z \quad (4-25)$$

式中  $F_{MAX}$ ——最大附着能力

轮胎与地面之间接触的合力称为轮胎力，其由纵向力与侧向力构成，公式如（4-26）所示。

$$F_{tir} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (4-26)$$

式中  $F_{tir}$ ——轮胎力

$F_x$ ——轮胎纵向力

$F_y$ ——轮胎侧向力

轮胎在任何时刻其轮胎力都小于等于其最大附着能力，如式（4-27）所示。

轮胎附着裕量表示了当前轮胎所剩附着能力，如式（4-28）所示。当机器人横滚角突然增大等情况下所需的侧向力会突然增大，此时如果轮胎的附着裕量不足将导致机器人侧滑。所以增大轮胎的附着裕量有助于提高机器人鲁棒性，增加工作安全性与可靠性。

$$F_{tir} \leq F_{MAX} \quad (4-27)$$

$$F'_{tir} = F_{MAX} - F_{tir} \quad (4-28)$$

式中  $F'_{tir}$  ——轮胎附着裕量

针对轮胎附着裕量，有学者提出了利用率的概念，轮胎利用率的表示方法如式（4-29）所示。从公式可以看出，利用率代表当前轮胎力占用轮胎最大附着力的百分比，当轮胎利用率达到 100% 时，轮胎附着裕量为 0。

$$U = \frac{\sqrt{F_X^2 + F_Y^2}}{\mu F_Z} = \frac{F_{tir}}{\mu F_Z} \quad (4-29)$$

式中  $U$  ——轮胎利用率

在先前涉及到轮式机器人轮胎利用率等研究中，由于侧向力无法准确估计，利用率的评估只考虑纵向力。但在坡道行驶工况下，由于垂直载荷的提高侧向力在轮胎力中占比较大，固不能将侧向力省略。上文提出的垂直载荷估计方法以及基于 Fiala 模型的侧向力估计方法则解决了侧向力评估这一问题。通过建立轮胎利用率的概念，机器人可以实时评估各个轮胎实际使用情况。为了提高轮胎附着能力，增加附着裕量，将全部轮胎利用率之和最小作为指标构造代价函数，利用拉格朗日乘数法解算各个轮胎的最优驱动力。在果园行间运行时，纵向力为主要被控对象，控制轮胎利用率主要为了控制纵向力的大小。因此，可以将侧向力的影响暂时忽略，则拉格朗日乘数法中的代价函数可以表示为如式（4-30）的形式。

$$p = \sum_{i=1}^2 \frac{F_X^2}{\mu^2 F_Z^2} \quad (4-30)$$

构造代价函数后，通过拉格朗日乘数法对单轮驱动力进行最优估计。根据拉格朗日乘数法，估计最优驱动力需要提供代价函数以及左右两侧的约束条件，左右两侧的约束条件为上一节中计算得到的左右两侧驱动力需求。根据以上的代价函数以及约束方程，就可以构造拉格朗日乘数法方程，求解得到单侧两轮的最优驱动力分配。



## 4.4 仿真验证

为验证本文提出的垂直载荷分配方法以及基于垂直载荷的驱动力优化分配方法,本节进行相关仿真实验,将仿真结果与本文提出的方法进行分析对比。由于轮胎与机器人的相对运动以及轮胎与路面的动力学特性,本文选取 ADAMS 软件进行动力学建模。ADAMS 中提供了标准的轮胎与路面模型文件并支持与 MATLAB 等软件进行联合仿真。利用 ADAMS&SIMULINK 联合仿真的方法进行验证有助于前期对机器人进行灵活运动控制与后期数据的分析处理。实验结果证明了垂直载荷估计方法以及基于垂直载荷的驱动力分配方法的可行性,同时对仿真数据分析后也验证了方法的理论正确性。

为完成垂直载荷估计算法的验证,基于本文第三章搭建的机器人动力学仿真模型进行仿真。为了说明垂直载荷估计方法的可行性,本文设置了两种不同类型路面进行仿真。第一种路面为铺装坡道,对于铺装路面而言,其路面不平度小可完全视为平面处理。第二种路面为符合国家 F 级标准不平度的自由路面,该种路面起伏大,可模拟果园非铺装路面环境。为了控制机器人与坡道或不平路面的相对位置,本文利用 ADAMS&SIMULINK 联合仿真方式对机器人动力学模型进行遥控控制,利用 SAIMULINK 通过手柄控制机器人在仿真环境中自由移动,整体模型如图(4-7)所示。

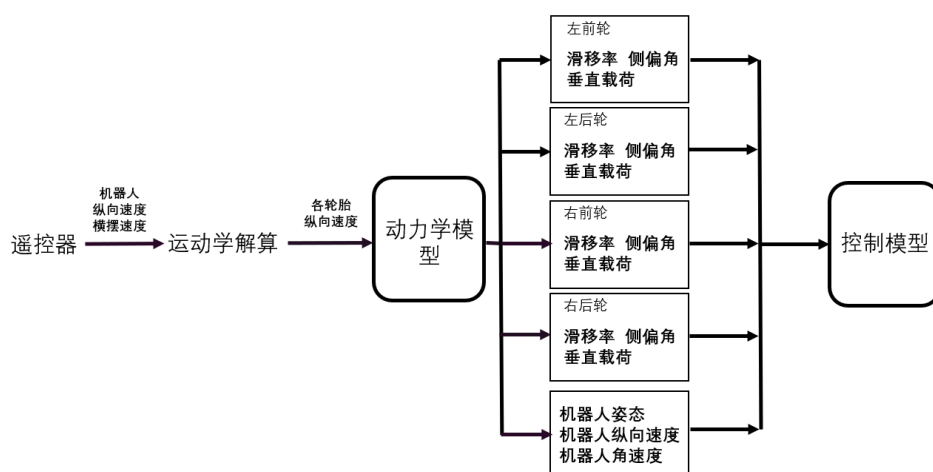


图 4-7 控制模型图

经过动力学仿真软件解算将各轮胎垂直载荷、纵向力、侧向力、侧偏角、滑移率以及机器人的欧拉角与各向速度反馈至控制模型中。构建以上动力学模型以及控制模型后,就可以通过机器人实时位姿进行垂直算法计算,并与仿真模型的载荷数据进行比对。

#### 4.4.1 垂直载荷估计方法验证

由于果园种植情况的限制,实际果园可通行区域内路面坡度较小,本文设置仿真中铺装坡道路面的坡度为 5 度,以上坡工况进行验证分析。调整机器人与坡道的相对位姿得到以下仿真数据,如表(4-3)所示。

表 4-3 垂直载荷仿真数据

实验组	偏航角/ $^{\circ}$	俯仰角/ $^{\circ}$	横滚角/ $^{\circ}$	左前轮载荷/N	左后轮载荷/N	右前轮载荷/N	右后轮载荷/N	四轮载荷之和/N	左前右后载荷之和/N	左后右前载荷之和/N
1	5	4.98	-0.436	762.8	922.5	752.9	912.6	3350.8	1675.4	1675.4
2	10	4.957	-0.87	768.7	926.6	748.8	906.7	3350.8	1675.4	1675.4
3	20	4.731	-1.71	782.1	932.8	742.6	983.3	3350.8	1675.4	1675.4
4	40	3.859	-3.223	813.5	936.5	739	862	3351	1675.5	1675.5
5	60	2.52	-4.345	847.9	928.2	747.2	827.6	3350.9	1675.4	1675.4
6	90	0	-5	895.3	896.6	778.8	780.2	3350.9	1675.5	1675.4

从实验数据可看出当四轮机器人偏航角不断加大时,其俯仰角与横滚角不断变化。当机器人正向于坡道时其俯仰角即为路面坡度,横滚角为 0 度。当机器人横向于坡道时,机器人俯仰角减小为 0 度,其横滚角增大到 5 度。观察实验结果中关于四轮垂直载荷之和的数据可以发现,处于同一坡度路面且各轮附着良好的情况下机器人的四轮载荷之和保持不变,四轮载荷之和与机器人处于坡道的相对姿态无关。利用仿真得到的机器人处于坡道时的绝对空间姿态对本文提出的垂直载荷计算方法进行方法验证。实验结果如表(4-4)所示。其中各组实验机器人的空间姿态与表(4-3)相对应。

表 4-4 垂直载荷实时估计结果

实验组	坡道角/ $^{\circ}$	左前轮载荷/N	左后轮载荷/N	右前轮载荷/N	右后轮载荷/N	左前右后载荷之和/N	左后右前载荷之和/N	四轮载荷之和/N
1	4.9991	771.14	961.49	746.88	937.23	1708.37	1708.37	3416.74
2	5.0326	787.26	968.9	739.48	921.12	1708.38	1708.38	3416.74
3	5.0313	825	973.16	735.35	883.35	1708.35	1708.51	3416.74
4	5.0263	837.5	932.4	779.8	874.7	1712.2	1712.2	3424.4
5	5	862.81	911.25	802.09	850.52	1713.33	1713.34	3426.67
6	5	950.24	950.24	758.22	758.22	1708.22	1708.22	3416.92

表四中,坡道角为根据机器人陀螺仪输出数据所生成的理想平面的坡道角,

从算法结果可以看出,其与所设定得路面情况基本一致。观察对角轮载荷之和的结果可以发现其验证了本文中所提出的当机器人质心位于几何中心时,机器人对角两轮载荷之和相等。根据实验数据可以发现,轮式机器人处于坡道路面时,其垂直载荷之和为机器人所受主应力  $F$ 。而分力  $F'$  的作用在于根据坡道偏航角的大小,对主应力进行再分配。综和以上分析结果,可以确定垂直载荷计算方法的理论正确性。下面对计算方法的准确性进行分析,整体误差情况如表(4-5)所示。

表 4-5 垂直载荷实时估计方法误差表

实验组	左前轮误差/N	左后轮误差/N	右前轮误差/N	右后轮误差/N	最大误差/N	最小误差/N	平均误差/N
1	8.34	38.99	6.02	24.63	38.99	6.02	19.49
2	18.56	42.3	9.32	14.42	42.3	9.32	21.15
3	42.9	40.36	7.25	99.95	99.95	7.25	47.615
4	24	4.1	40.8	12.7	40.8	4.1	20.4
5	14.91	16.95	54.89	22.92	54.89	14.91	27.4
6	54.94	53.64	20.58	21.98	54.94	20.58	37.78

在 5 度平整坡道条件下机器人各轮垂直载荷处于 700N 到 1000N 之间,误差最小为 4.1N 最大不超过 100N。从载荷中可以明显区分出各轮垂直载荷的差异,这对于机器人参数分析已经可以达到要求,后续轮胎利用率等方法可依照该算法计算所得垂直载荷进行分析。

上面分析了铺装路面下机器人处于坡道时各轮垂直载荷情况,下面针对果园非铺装路面的垂直载荷进行分析。利用遥控器使机器人行驶于国家 E 级路面上,任意提取 5 组不同时刻的机器人姿态以及垂直载荷。仿真结果如表(4-6)所示。

表 4-6 E 级路面下垂直载荷仿真数据

实验组	偏航角/ $^{\circ}$	俯仰角/ $^{\circ}$	横滚角/ $^{\circ}$	左前轮载荷/N	左后轮载荷/N	右前轮载荷/N	右后轮载荷/N	四轮载荷之和/N	左前右后载荷之和/N	左后右前载荷之和/N
1	11.21	-12.9	2.55	1009	570.7	1040	656	3275.7	1665	1610.7
2	10.6	-10.9	-1.55	1279	433	681	938	3331	2217	1114
3	2.07	-4.99	0.63	788.6	871.9	725.8	963	3349.3	1751.6	1597.7
4	25.26	-11.9	5.58	977.5	535.6	1042	722	3277.1	1699.5	1559.6
5	1.63	-2.31	-0.74	842.2	855.2	910.8	752.8	3361	1595	1766

根据前文对平整坡道下垂直载荷研究,当四轮附着条件良好时,四轮机器人对角轮的垂直载荷之和应当一致。观察表 6 中的对角轮之和数据可以发现,5 组

数据的对角轮载荷之和均不相等，其中最第二组中产生了最大的 1103N 对角轮载荷差值，五组仿真中最小的差值也达到了 50N。当四轮中其中一轮处于半接触状态时，机器人姿态可能不会改变，但其它轮胎的负载加大以使得机器人处于平衡状态。下面给出垂直载荷计算方法在不平路面下得到的计算数据。结果如表（4-7）所示，其中各组实验机器人的空间姿态与表（4-6）一一对应。

表 4-7 E 级路面下垂直载荷实时估计结果

实验组	左前轮载荷/N	左后轮载荷/N	右前轮载荷/N	右后轮载荷/N	左前右后载荷之和/N	左后右前载荷之和/N	四轮载荷和/N
1	1135.44	672.44	996.4	533.4	1668.84	1668.84	3338.68
2	690.9	1090.44	592.27	992.27	1683.17	1683.71	3365.88
3	764.16	956.81	751.56	944.21	1708.37	1708.37	3416.74
4	1064.4	583.9	1058.7	584.2	1648.6	1648.6	3291.2
5	824.09	911.95	801.51	889.37	1713.46	1713.46	3426.91

观察表（4-6）与表（4-7）的结果，当仿真中对角轮载荷之和偏差较大时，可以判断出当前机器人附着情况较差，因此按照理想接触条件下的计算结果偏差较大。当机器人整体附着情况较好时，计算结果与仿真数值偏差较小，如第一组实验。根据以上对非铺装路面的仿真与分析，可以看出当机器人行驶于非铺装路面时垂直载荷算法在附着良好情况下可以反应出各轮载荷实际情况以及变化趋势。

对垂直载荷估计方法进行实际验证。经实测机器人总重 343 千克且质心与几何中心重合。实验如图 11 所示。各轮压力拉压力传感器进行测量。传感器输出为模拟量，经变送器转换为数字量发送到显示端。传感器测量精度为 0.01%，变送器精度为 0.02%。同时，由于机械结构存在一定制造及装配误差，经过测试垂直载荷测量装置综合精度为 0.1%。



图 4-8 垂直载荷估计实验

将机器人置于 2 度斜坡，取坡道偏航角为 20 度姿态并在各轮胎下方放入称重装置并读取机器人陀螺仪与四个称重装置数值。实测与计算结果如表 8 所示。根据实验结果，垂直载荷估计方法准确率达到 90% 以上。误差来源主要包括称重装置存在微小高度差以及机器人存在一定的装配误差等。

表 4-8 垂直载荷实测结果

	左前轮	左后轮	右前轮	右后轮
垂直载荷实测结果/N	840.2	930.4	770.4	880.3
垂直载荷计算结果/N	868.5	904.5	809.5	845.5
误差/N	28.3	25.9	39.1	34.8
计算准确率	96.6%	97.2%	95.2%	96%

#### 4.4.2 驱动力优化分配方法验证

驱动力优化算法首先要根据上文提出的差速轮式机器人坡道稳态转向动力学方程计算得出左右侧驱动力需求，之后根据各轮垂直载荷灵活调整单侧驱动力分配。为计算驱动力需求，需对轮胎所受侧向力进行估计。按照上文提出基于 FIALA 轮胎动力学模型的方法，计算侧向力时要求已知轮胎基本参数、路面摩擦系数、垂直载荷、滑移率、侧偏角等信息。为了通过仿真验证侧向力估计的准确性，在计算中轮胎刚度参数与 ADAMS 中设定参数保持一致，滑移率与侧偏角与垂直载荷按照仿真中给出的结果带入计算。仿真设定机器人以 0.2 米每秒的纵向速度在 2 度斜坡进行等半径转向。设计实验转向半径为 10 米，转向方向为沿机器人 Z 轴正向旋转。本文选取机器人运动方向沿坡道梯度方向时进行分析。下面首先给出机器人以半径为 10m 进行稳态转向的仿真结果，如表（4-8）所示。

表 4-8 半径 10 米稳态转向仿真数据

	滑移率	侧偏角/rad	垂直载荷/N	纵向力/N	侧向力/N
左前轮	-0.0246	0.0414	808.4	-372.7	-555.7
左后轮	-0.0248	-0.0391	873.3	-376.6	554.1
右前轮	0.0297	0.0413	808.4	430.2	-552.6
右后轮	0.0294	-0.0391	873.3	436.4	550.1

根据以上仿真结果将各轮滑移率、垂直载荷、侧偏角带入在 SIMULINK 中搭建好的轮胎动力学模型中求解当前轮胎侧向力，计算结果如表（4-9）所示。

表 4-9 侧向力计算结果

	左前轮	左后轮	右前轮	右后轮
侧向力仿真结果/N	-555.7	554.1	-552.6	550.1
侧向力计算结果/N	-528.7	546.1	-535.3	589.5
误差/N	27	8	17.3	39.4
计算准确率	95.1%	98.6%	96.9%	92.8%

根据计算结果可以发现,侧向力计算结果准确率达到 92%以上准确率较高,对于果园坡度路面的以满足应用要求。

对实际机器人系统进行侧向力估计实验验证。侧向力检测装置如图(4-9)所示,经过减速器以及机械结构的力分解,测量轴只受动力输出轴沿轴向的拉压力影响。侧向力测量装置装配零件多,装配精度低于垂直载荷传感器。综合传感器误差及机械结构误差,测量装置的总体测量精度为 0.3%,精度条件满足验证侧向力估计方法的需求。



图 4-9 侧向力实验装置

设定机器人以 0.2m/s 纵向速度进行半径 10m 匀速转向。设定路面最大附着系数 0.6 最小附着系数 0.5。实验环境如图(4-10)所示。



图 4-10 侧向力实验环境

机器人进行匀速等半径转向，因此侧偏角保持不变。分析不同垂直载荷下的侧向力仿真值、估计值、测量值。侧向力实验结果如表（4-10）所示。

表 4-10 侧向力实验结果统计

垂直载荷/N	仿真-侧向力/N	估计-侧向力/N	实测-侧向力/N
655.7	277.9	266.3	310
741.2	335.4	310.7	333.1
833.1	374.2	355.1	406.4
910.9	410.6	399.5	442.8

根据实验数据，侧向力估计方法准确率达到 85%以上。误差来源主要包括机器人运行过程中的低频振动、路面阶跃激励输入、传感器精度等。

为了说明驱动力优化对于机器人稳定性的提升，下面利用表（4-8）的仿真结果对不进行驱动力分配的轮胎使用情况进行分析，设当前路面摩擦系数为 0.9 与 ADAMS 中设置保持一致。分析结果如表（4-11）所示。

表 4-11 轮胎使用情况统计

	左前轮	左后轮	右前轮	右后轮
轮胎力/N	669.1	669.9	700.3	702.17
最大附着能力/N	727.56	785.97	727.56	787.98
附着裕量/N	58.46	116.07	27.26	85.81
轮胎利用率	91%	85.23%	96.25%	89%

从表 10 可以看出，机器人在大半径转向下的轮胎利用率已经较高，这是由于差速轮式机器人转向过程中伴随着较大的侧偏角导致侧向力较大。大侧向力则要求更高的驱动力，总体呈现出轮胎力高于其他转向的形式的情况。表 10 中右前轮的利用率已经达到 96.25%而附着裕量仅为 27.26N，这是由于该轮垂直载荷较低，而所承受的轮胎力又由于侧偏角与滑移率的影响高于左前轮与左后轮。当该轮胎以当前状态驶入湿滑泥泞路面时容易造成侧滑及轮胎空转等情况。因此根据当前轮胎附着能力实时调整动力分配可将驱动力更多的赋予到附着条件更优的轮胎，使机器人整体稳定性得到提升。下面给出按照拉格朗日乘数法分配的轮胎动力输出结果。两侧轮胎驱动力要求按照表（4-8）中的仿真结果给定，其中左侧两轮驱动力要求为 749.3N 右侧两轮驱动力需求为 866.6N。重新分配后各轮驱动力以及轮胎使用情况如表（4-12）所示。

表 4-12 驱动力优化后的轮胎适用情况统计

	左前轮	左后轮	右前轮	右后轮
优化纵向力/N	345.77	403.52	399.9	466.69
轮胎力/N	654.49	685.46	682.12	721.39
最大附着能力/N	727.56	785.97	727.56	787.98
附着裕量/N	73.07	100.51	45.44	66.59
轮胎利用率	89.96%	87.21%	93.75%	91.55%

对比表（4-11）与表（4-12）可发现，当根据垂直载荷动态分配驱动力后，机器人运行于坡道时将更多的驱动力分配给附着能力更高的轮胎。轮胎最低附着裕量由先前的 27.26 提高至 45.44。综合以上结果，通过轮胎侧向力估计后根据利用率分配的驱动力设定方式提高了滑动轮式机器人在果园环境下运行稳定性。

## 4.5 本章小结

本章提出的垂直载荷分配方法可以有效的对四轮滑动转向机器人进行垂直载荷估计。通过垂直载荷计算方法与仿真验证可以发现，当机器人质心位于几何中心时，其对角轮垂直载荷之和相等。当机器人处于铺装路面时其垂直载荷估计具有较高精度。从仿真结果对比来看，铺装路面下最大误差为 10.07%。当机器人处于非铺装果园路面时，其计算精度主要取决于四轮附着情况。

在轮胎动力优化分配前首先进行的侧向力估计中，基于 Fiala 轮胎模型的侧向力估计精度达到 92%以上，可以准确的反映出机器人处于转向过程中的侧向力大小。侧向力的大小直接影响了轮胎动力分配比例，因此对后文提出的动力优化分配产生重要影响。本文提出的基于垂直载荷的驱动力优化方法可以有效控制轮胎利用率，向附着能力高的轮胎分配更多的驱动力，根据实验数据，该方法将轮胎的利用率从 96.25%降低至 93.75%。降低轮胎利用率使得机器人运行过程中的控制稳定性得到提高。



## 第五章 机器人行间自主运行

本章节主要研究轮式滑动转向机器人在标准化种植低郁密度条件下的果树行间自主运行问题。在该条件下果树排列整齐，两行之间趋于平行并且无果树缺失的情况，果树中间可通行区域较为明显且无其他物体遮挡。由于机器人工作环境处于室外，为了避免雨水光照等天气影响，本文采用基于激光雷达的导航方案。当果园郁密度较高时，可通行区域中植被遮挡较为严重，独立依靠激光雷达难以完成自主运行任务，固本文只考虑低郁密度情况下的自主运行问题。本章第一节，对激光雷达点云数据进行处理并生成可用于轨迹追踪的导航线。第二节，设计了适用于果园环境下的三种不同轨迹追踪方法并进行仿真验证。整体控制模型如图（5-1）所示。

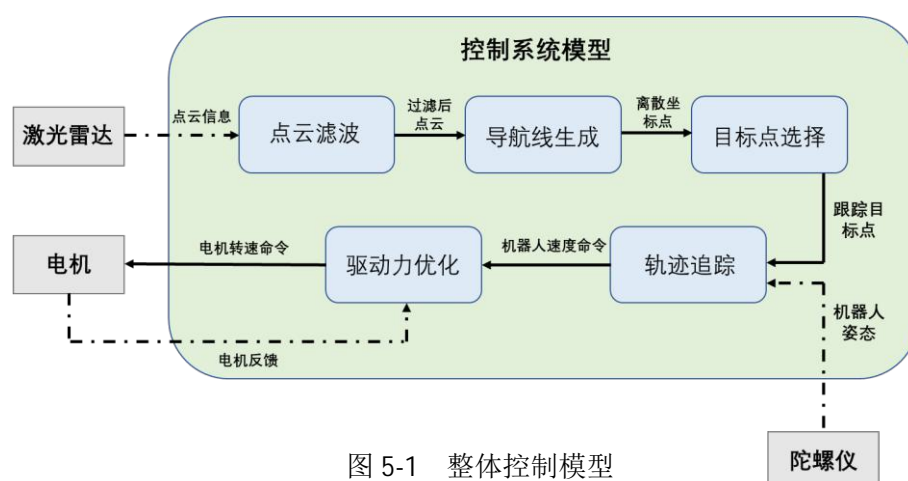


图 5-1 整体控制模型

### 5.1 点云处理与导航线生成

由于本文机器人应用于户外环境，为满足户外防护条件，选用 sick LMS111 型号的单线激光雷达。LMS111 激光测量系统采用成熟的激光-时间飞行原理，非接触式检测，且加入了最新的多次回波检测技术两次回波，这使得 LMS111 激光测量系统即使在恶劣环境下也能准确测量。LMS111 的主要特点为：IP67 的防护等级，雾气校正功能及内部集成加热器，保证其能用于户外，大监控范围（270 的扫描角度），灵活的区域配置（可以根据现场需要，设置各种图形的保护区域，且可以根据现场的需要，随时简单的修改图形），LMS111 激光测量系统还具有自检功能，检测稳定，对低反射率物体不敏感等优点该雷达扫描范围为负 45 度到

正 225 度，扫描分辨率为 0.5 度，最大扫描距离为 20 米。

为完成激光点云处理算法，本文选用某标准种植葡萄园进行激光雷达数据收集工作。果园实际场景如图（5-2）所示。



图 5-2 果园实际场景

从上图可以看出，该葡萄园两行植被之间可通行区域较为明显，但由于植物处于生长初期，当前行间两侧的植被也很容易被传感器所捕获。上图为果园行间局部样貌，下面给出该果园种植整体情况示意图如（5-3）所示。

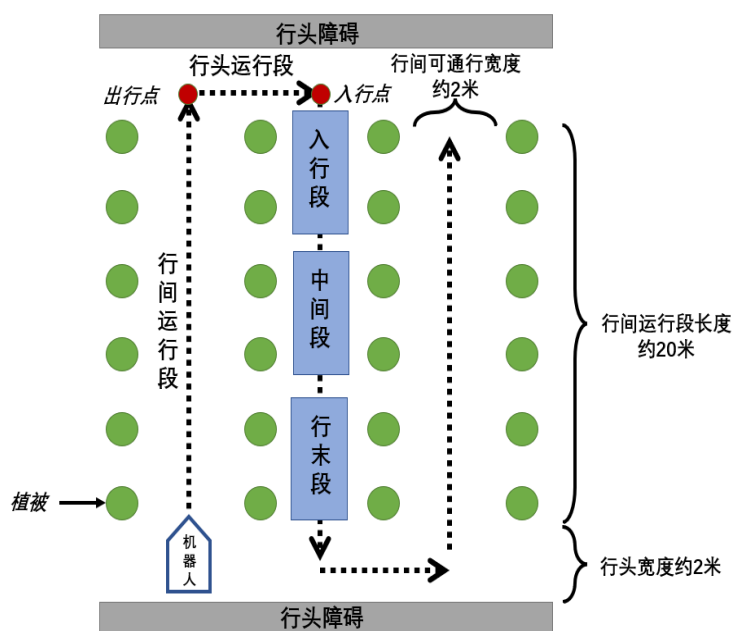


图 5-3 整体种植情况

如上图所示，植被成行种植，每行植被长度约为 20 米，两行植被中间可供

机器人通行宽度约为 2 米。果树种植行头宽度约为 2 米，可供机器人执行换行操作。依据该果园实际情况，对机器人自主运行阶段进行规划。将机器人置于某起始位置后，随即开始自主运行。首先，机器人运行于行间段时由于激光雷达点云数据不同，如图（5-4）所示，可将行间段细分为入行段、中间段、行末段。当机器人行驶于行末段并到达出行点后，机器人执行 90 度原地转向动作。之后利用伺服电机记录机器人行驶距离，当距离满足指定宽度后，机器人再次进行 90 度转向，转向后即又进入行间运行，如此往复。由于机器人位于行头运行段时不需要基于激光雷达的自主导航而只依靠伺服电机的编码器记录行驶距离即可。因此，本章只考虑行间运行时的导航线生成及轨迹跟踪。

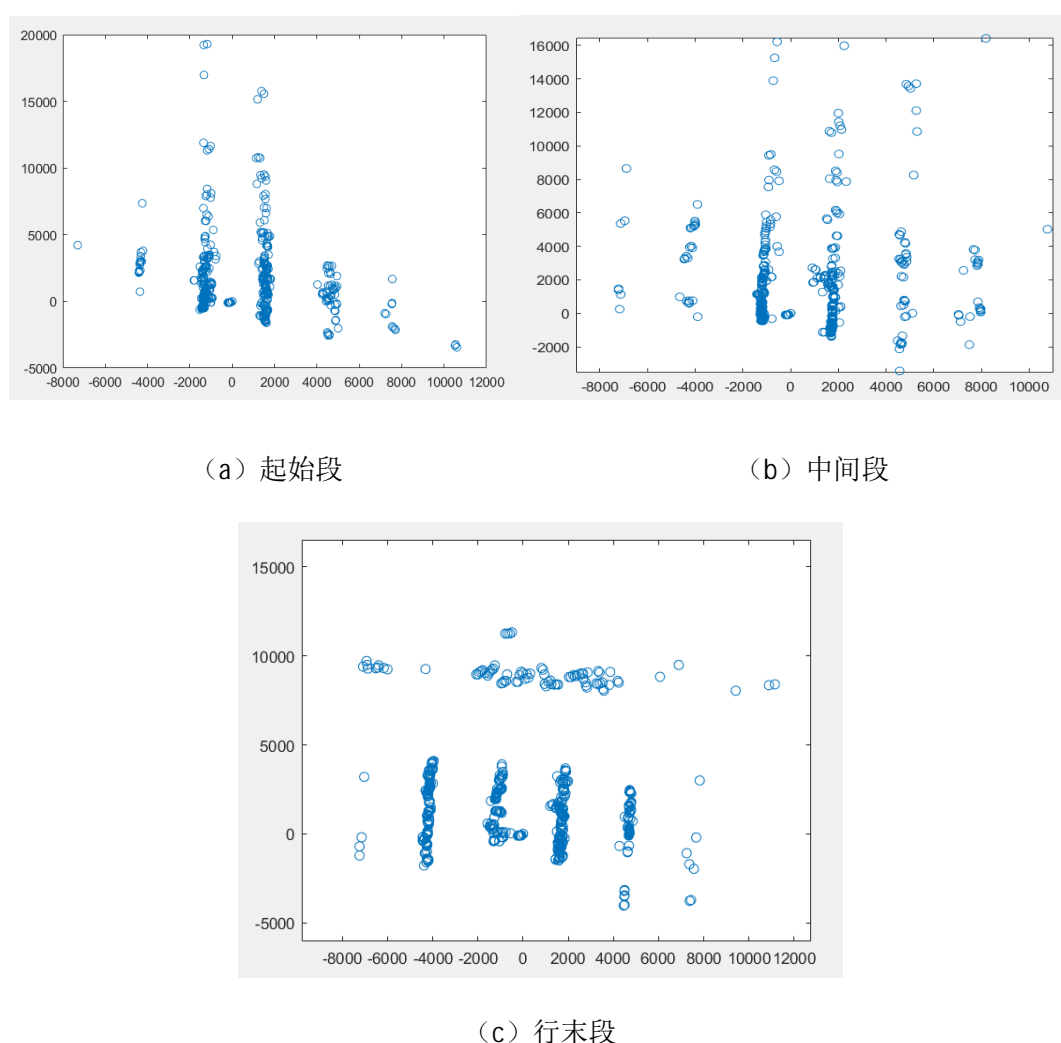


图 5-4 果园场景原始点云图

从起始段、中间段、行末段可以看出明显不同。起始阶段两侧相邻行植被所产生的干扰点云较少。中间段，受植被密度以及生长情况的影响，两侧干扰点云

较为严重。行末段，干扰依然严重，同时激光雷达前方出现大量横置点云。观察原始点云图，两侧植被呈直线趋势已经较为明显，但还存在激光雷达近处的干扰点云以及其他临近行植被的干扰点云。为了提高导航线精度加快计算时间，需要对点云进行处理去除干扰。本文为排除邻近行植被以及附近植被的点云干扰，设置了以激光雷达为原点的 ROI 区域，再利用动态半径滤波方法减少点云处理数量，加快处理速度。经过处理算法后，点云效果如图（5-5）所示。

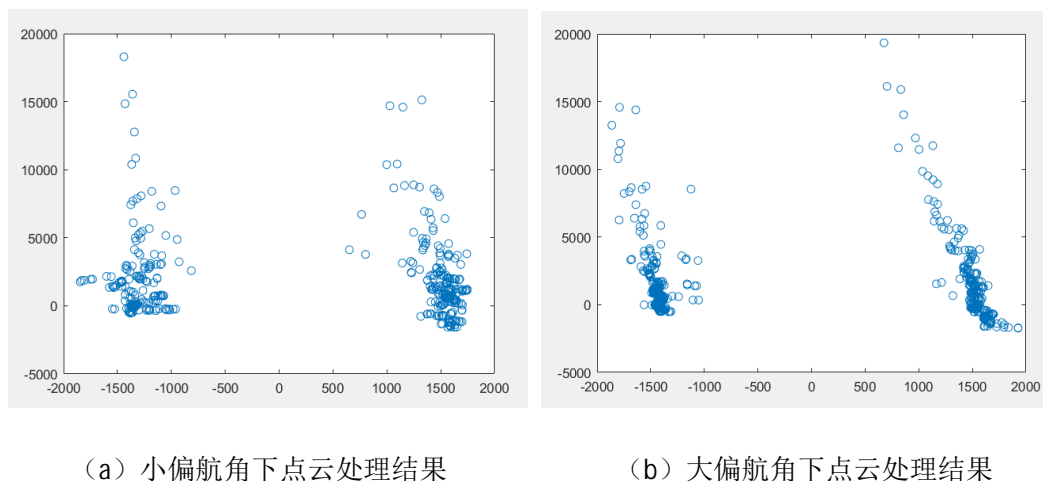


图 5-5 处理后点云图

由于机器人在行间运行时，航向姿态随时可能出现变化，为了验证点云处理方法的鲁棒性，分别测试机器人在小偏航角下及大偏航角下的点云处理结果。从上图中可以看出，机器人在任意姿态下的点云都得到很好的处理，近处干扰点云以及邻近行干扰点云基本被去除。

得到了处理后的点云数据，将左右两侧植被点云分别拟合为两条直线，再将两条直线进行叠加即可完成导航线生成。对于两行植被点云数据的拟合，本文应用随机采样一致方法完成。随机采样一致方法基于三点假设，首先数据由“局内点”组成，“局内点”的数据分布可以用一些模型参数来解释。其次，全部数据中包涵“局外点”，“局外点”是不可以适用于数学模型的数据。最后，全部数据中还包括噪声点。该方法可以从一组包含“局外点”的观测数据集中，通过迭代方式估计数学模型的参数。该方法最典型的应用即为二维直线拟合。该方法相较于更为简单的最小二乘法具有明显优势，最小二乘法不能找到适应于局内点的直线，因为最小二乘法尽量去适应包括局外点在内的所有点，其考虑了干扰点与局外点的影响。相反，随机采样一致方法能得出一个仅仅用“局内点”计算出模型，因此拟合准确率高于最小二乘法。

利用随机采样一致算法，设置距离阈值为 120 毫米，最少满足点云数量为总

点云的 50%，拟合后直接生成导航线。分别测试小偏航角以及大偏航角的拟合结果。如图（5-6）所示。

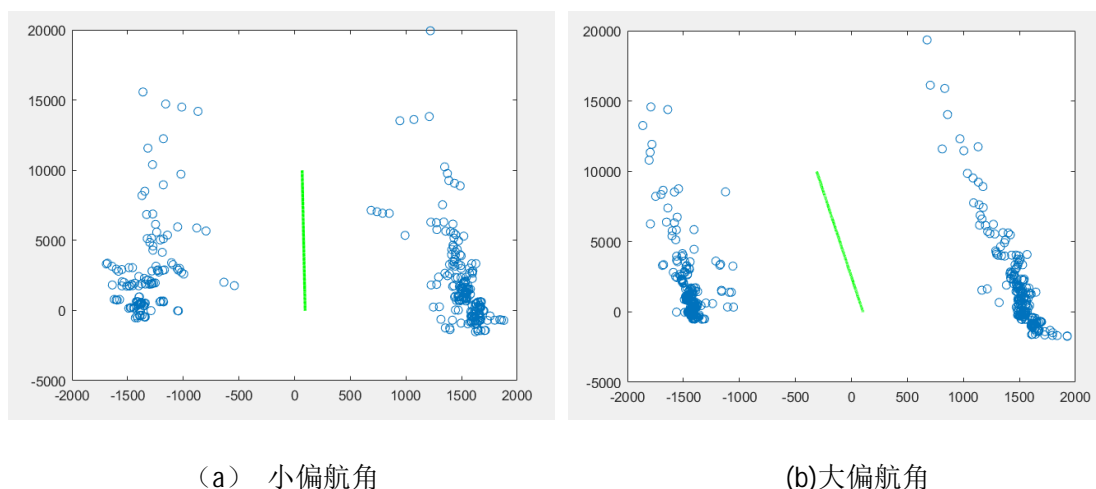


图 5-6 不同机器人姿态下导航线生成效果

如上面两图所示，在小偏航角下，点云总量为 334 个，满足拟合要求点云数量为 247 个，拟合成功率为 74%。在大偏航角下，点云总量为 438 个，满足距离阈值点云数 340 个，拟合成功率为 77.6%。综上，经点云处理后生成的导航线质量较好，可用于轨迹跟踪。

## 5.2 果园环境下轮式滑动转向机器人轨迹跟踪方法研究

本节主要研究轮式滑动转向机器人在果园行间直线段的轨迹跟踪方法。由于基于激光雷达的导航方法无法获得机器人自身位置信息，因此运行中始终以机器人几何中心作为坐标原点。根据实际生产需要，机器人在行间行驶时始终以 0.3m/s 的速度运行。上节中，机器人通过激光雷达提取点云数据，并通过算法进行数据处理并生成导航线。在轨迹跟踪前，首先将导航线离散化，选取最近的目标点，最后根据轨迹跟踪算法计算机器人目标角速度。受果园地面起伏不平，附着能力不均等影响，参数变化范围较大，更适用于无模型的轨迹跟踪控制器。本文分别设计了基于 PID、纯追踪、模糊控制的轨迹跟踪方法进行对比测试。首先对三种控制器进行说明<sup>[45]</sup>。

### 5.2.1 PID 轨迹跟踪方法

PID 控制器具有原理简单、适用面广、控制参数相互独立、参数整定简单、易于调试等优点。因此，自诞生以来 PID 控制器被广大科技人员及现场操作人员

所采用，并积累了大量的经验。当被控对象的结构和参数不能完全掌握，或得不到精确的数学模型，或控制理论的其他技术难以采用时，系统控制器的结构和参数必须依靠经验和现场调试来确定，这时应用 PID 控制技术最为方便。如上文所述，当机器人运行于果园环境时，由于机器人动力学参数变化大导致无法通过数学模型等手段进行控制，因此 PID 适合于果园条件下的轮式差速转向机器人轨迹跟踪问题。本文 PID 控制器的应用如图（5-7）所示。

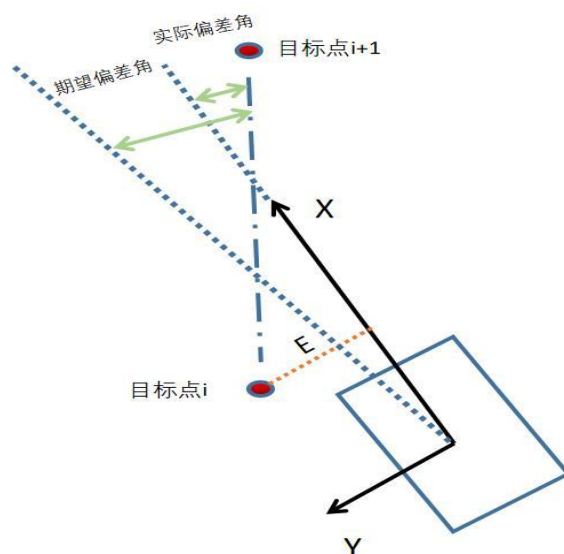


图 5-7 基于 PID 的轨迹追踪方法示意图

如上图所示，首先，机器人选取距离自身前方最近的目标点  $i$  以及  $i+1$  点，并以这两点构造直线并提取该直线斜率，通过计算得到当前机器人正向方向与该直线之间的夹角，该角度记为实际偏差角。其次，以  $i$  点到机器人坐标系  $X$  轴的距离作为横向偏差值，以  $i$  点作为偏差值计算基准时，机器人将更快跟踪既定曲线。再次，将横向偏差乘以一比例系数，作为机器人期望偏差角。偏差越大期望偏差角越大，即以更快的速度向期望点逼近。最后，将期望偏差角减去实际偏差角作为车辆实时跟踪角度，并将跟踪角度作为输入，通过 PID 控制器计算出机器人所需角速度。机器人跟踪角度越大，PID 输出角速度越大。

### 5.2.2 模糊控制方法

当系统的复杂性越高，人们按照数学模型等方法精确控制的能力会下降。这意味着人们无法完全掌握一些十分复杂的系统。但在实际生活中，人们在遇到复杂问题时，往往依靠丰富的经验解决，而不是了解事物本质。因此可以看出“人类经验”才是最完美的控制器。而模糊控制器就是一种最简单的基于人工经验的人脑模拟器。



根据系统输入输出划分,本文属于双输入单输出控制器。与PID方法前几步相同,首先计算车机器人与目标点线段的实际偏差角,其次计算与最近点的横向偏差。模糊控制器以实际偏差角与横向偏差作为输入参数,为使轨迹跟踪稳态误差更小,将两个输入参数分别划分为8个论域:负大、负中、负小、零负、零正、正小、正中、正大。隶属函数部分选择了成熟的高斯分布钟形模型,设定模糊控制器输出为机器人横摆角速度,论域数量与隶属度函数与输入相同。不断实验后,经过参数调整,模糊规则表最终如表(5-1)所示。

表 5-1 模糊规则表

横向偏差 偏航角	NB	NM	NS	N0	P0	PS	PM	PB
NB	N0	N0	NM	NB	NB	NB	NB	NB
NM	N0	NS	NM	NB	NB	NB	NB	NB
NS	PM	PS	P0	P0	NS	NM	NB	NB
N0	PB	PB	PS	P0	N0	NS	NM	NB
P0	PB	PM	PS	P0	N0	NS	NB	NB
PS	PB	PB	PM	PS	N0	N0	NS	NM
PM	PB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	P0
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PM	P0	P0

当输入变量进入模糊控制器后得到输出变量论域后,经过解模糊即可获得输出变量大小,本文选用重心法对输出值进行解模糊操作,经过解模糊后的输出值即为机器人横摆角速度。该模糊控制器基本执行逻辑如下,当机器人横向偏差较大且行驶方向更加偏离目标时,控制器输出较大横摆角速度使机器人以最快速度指向目标直线。当机器人接近目标时,还以较大角度向目标逼近时,为了防止超调,控制器输出最大反向角速度。其他情况以此类推。

### 5.2.3 纯追踪方法

纯追踪模型目前已广泛应用于车辆自动驾驶领域。纯追踪理论以单车模型为基础,基于几何模型推导出前轮所需转向角,因此纯追踪方法适用于阿克曼转向形式。纯追踪模型的优势在于其可以通过前视距离这一参数灵活调整机器人跟踪反应程度,当前视距离越大,机器人“看的越远”其跟踪曲线就越平缓。基于单车模型的纯追踪方法示意图如(5-8)所示。

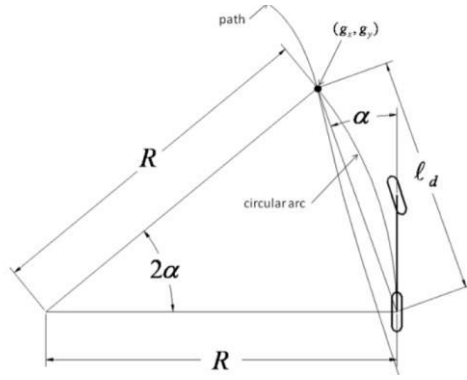


图 5-8 纯追踪方法

图中  $(g_x, g_y)$  为机器人下一个要追踪的目标点，其位于生成的导航线上， $l_d$  表示机器人后轴到目标点的距离，角  $\alpha$  为机器人纵向方向与目标点之间夹角。根据正弦定理我们可以推导出以下关系。

$$\frac{l_d}{\sin(2\alpha)} = \frac{R}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha)} \quad (5-1)$$

$$\frac{l_d}{2\sin\alpha\cos\alpha} = \frac{R}{\cos\alpha} \quad (5-2)$$

$$\frac{l_d}{\sin\alpha} = 2R \quad (5-3)$$

从式 (5-3) 可以看出，当机器人距离下一个目标点距离越远，机器人转向半径越大跟踪曲线即越平稳。式中  $l_d$  为机器人前视距离，前视距离为纯追踪要设定的参数，通常前视距离可以按式 (5-4) 表示。

$$l_d = kv + l_f \quad (5-4)$$

式中  $k$  为一比例系数， $v$  为机器人运行线速度， $l_f$  为机器人基础前视距离。比例系数  $k$  根据不同工作环境以及机器人设定运行速度选取。当  $k$  值选取越大，机器人的前视距离随速度变化越大。基础前视距离为确保机器人在低速状态下仍具有一定前视距离。根据公式 (5-3) 我们可以基于前视距离以及偏差角度推导出机器人所需转弯半径，对于阿克曼转向形式可以根据转向半径推导出前轮转向角度，而滑动转向方式不存在前轮转向角，因此根据滑动转向机器人运动学对纯追踪算法进行一定修正。机器人具有如下运动学方程，如式 (5-5) 所示。

$$R = \frac{v}{w} \quad (5-5)$$

式中， $w$  为机器人横摆角速度。联立式 (5-4) 与 (5-5) 可以解得基于差速转向机器人的纯跟踪方法，如下式所示。

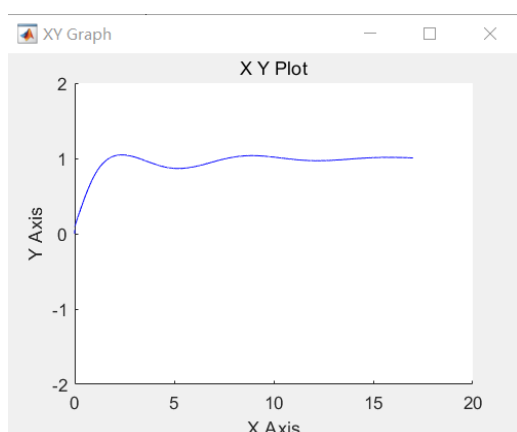


$$w = \frac{2v \sin \alpha}{kv + l_f} \quad (5-6)$$

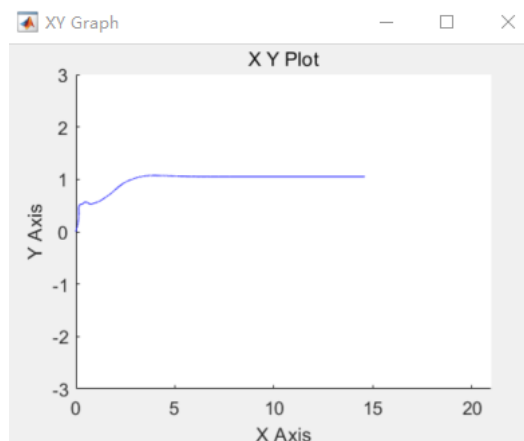
如上式所示，像机器人输入与目标点偏差角度以及机器人线速度，即可求解当前机器人所需横摆角速度，从而完成轨迹跟踪任务。

#### 5.2.4 轨迹跟踪方法仿真实验

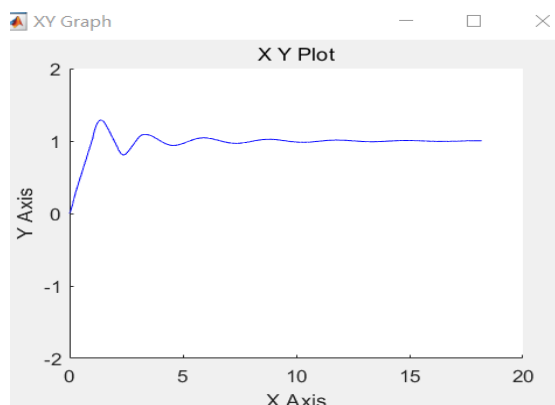
为了对比 PID、模糊控制、纯跟踪三种轨迹跟踪方法对于轮式差速转向机器人在果园环境下的控制效果，本小节对三种方法进行仿真验证。实验基于在第三章中搭建好的多体动力学仿真模型进行，路面同样采用第三章中创建的国家标准 F 级路面。仿真初始位置为 (0,0) 点车头朝向为 x 轴正向，给定目标曲线为  $y=1$ ，机器人初始线速度为 0.3 米每秒，角速度为 0。



(a) PID



(b) 模糊控制



(c)纯追踪

图 5-9 三种控制器效果对比

图（5-9）分别为 PID、模糊控制以及纯追踪控制效果。下面对三种方法的控制效果进行分析

基于 PID 的控制方法下，机器人行驶 1.8 米后首次到达目标值。继续行进到沿 X 方向 2 米时，产生了 0.08 米的超调，之后机器人跟踪曲线时不断波动。当机器人行进到 8 米时，机器人横向误差收敛在 0.05 米范围内。仿真中，机器人共沿 X 方向行进了 18 米最后时刻偏差为 0.004 米。

基于模糊控制的轨迹跟踪方法下，机器人沿 X 方向行驶 2.6 米后首次到达目标位置，之后沿 X 方向行进 3 米时产生了 0.07 米的超调量。当机器人继续运行时，曲线逐渐向目标靠近，不再出现波动，仿真中，机器人运行到 15 米时误差为 0.04 米。

基于纯追踪控制的轨迹跟踪方法下，机器人沿 X 方向行驶 1.6 米后首次到达目标位置，之后行进到沿 x 方向 1.9 米时产生了 0.27 米的超调，超调量相较于其他两种方法较大。机器人继续运行时曲线不断波动。当机器人行进到沿 X 方向 5 米时，偏差收敛在 0.05 米的范围内，仿真共进行了 18 米最后偏差为 0.0035 米。

综合实验结果进行对比。模糊控制具有跟踪平滑，超调量小，后期无反复波动等特点。稳态误差问题也可以通过输入及输出端论域划分得到进一步解决。

为了进一步验证模糊控制器追踪效果，利用自动驾驶工具箱生成运行轨迹并提取路径坐标。生成的导航轨迹点中，每两点之间，间距及偏角均不等。提取坐标后对个别坐标进一步修改，增加偏离点干扰。以此生成更为复杂的曲线路径。生成的路径如图（5-10）所示。

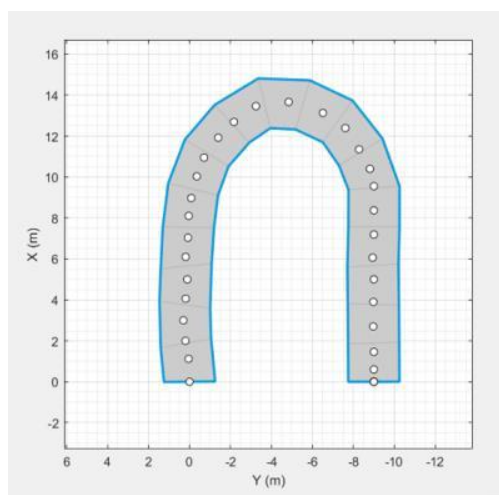


图 5-10 复杂路径设计

仿真过程中设计了离群点以及大半径掉头等情况，机器人在运行过程中最大偏差为 0.04 米，误差在可接受范围内。根据以上仿真结果，模糊控制方法在起

伏不平的果园路况下具有较好的适应性。

### 5.3 本章小结

本章首节，介绍了适用于户外果园环境下的激光雷达 LM111 相关参数。在某标准化种植的葡萄园内进行了激光雷达点云数据收集工作。通过分析果园实际点云数据后发现，在原始点云数据中存在激光雷达近点干扰以及临近行干扰的情况。为此，本文利用 ROI 方法设置点云筛选区域，再利用动态半径滤波方法对部分离群点进行剔除。经过处理后的点云数据干扰点数量明显减少，在点云图像中不再存在临近行干扰。将处理后的点云利用随机采样一致方法进行两侧果树排架拟合，结果表明，不论在机器人的航向角与可通行区域前进方向偏差较小或较大，拟合结果均能满足使用要求。

本章第二节主要研究了三种控制方法对果园条件下轮式滑动转向机器人轨迹跟踪的控制效果。本文选用的 PID 以及模糊控制均为无模型控制手段，由于不需要运动过程的精确模型，使用较为方便。本文对基于单车模型的纯追踪控制方法做出了调整，使其原本的输出前轮转向角改为输出机器人横摆角速度。本节末尾，基于第三章搭建的仿真环境对三种方法控制效果进行验证。实验结果表明，三种方法均能在复杂路况下跟踪给定目标。综合比对结果，模糊控制方法的跟踪轨迹更加平滑，并且无反复波动。通过对模糊控制进一步仿真，设置了离群点以及大半径转向等情况后模糊控制器跟踪效果依旧稳定。

## 第六章 总结与展望

### 6.1 工作总结

本文针对果园环境下的轮式滑动转向机器人运动控制问题与行间自主运行问题展开研究与分析。设计了适用于果园户外环境的轮式差速机器人建立了机器人动力学整体仿真环境，同时研究了该环境下机器人相关控制问题；针对规范种植的低郁密度果园，研究了基于激光雷达方式的机器人路径生成以及不平路况下机器人沿导航线轨迹跟踪问题。

本文首先分析了机器人相关理论。给出了理想状态下机器人运动学方程以及考虑滑移过程的运动学方程并推导了滑移对轮胎侧偏角的影响。之后，介绍了对机器人动力学有重要影响的轮胎动力学，分析了对轮胎输出有重要影响的相关参数。给出了机器人瞬态动力学，针对本文果园环境，特别的分析了当机器人处于坡道情况时的稳态动力学特性。

之后，主要针对户外果园环境设计了机器人机械结构，机器人满足了模块化、通过性、防护性要求。根据结构参数以及设计工况完成了机器人的动力选型工作。选取了受力最复杂的零件进行了有限元仿真验证。为了后续控制方法研究，基于 ADAMS 多体动力学软件搭建了机器人仿真模型。为模拟果园条件下起伏不平的道路情况，利用正弦波叠加法生成了满足国家标准的 F 级路面。

本文研究了在果园条件下的滑动转向控制问题。由于在果园条件下路面起伏较大，导致轮胎力受各轮垂直载荷变化影响较大。复杂的路况使得难以对机器人轮胎的侧向力以及纵向力进行精确估计，从而使机器人精确控制受到影响。针对这一问题，本文提出了基于机器人空间姿态的各轮垂直载荷实时估计方法。该方法在机器人各轮胎附着良好条件下准确率较高，最大误差为 10.07%。同时，本文提出了基于 Fiala 轮胎模型的侧向力实时估计方法，精度达到 92%以上。基于机器人坡道稳态转向动力学、垂直载荷以及侧向力，本文通过优化手段对机器人驱动力进行优化分配，使轮胎附着力得到了明显提高。

最后，本文对果园条件下机器人自主导航问题进行了分析并设计了基于激光雷达的自主导航方案。通过激光雷达点云数据处理及点云数据拟合后，可生成满足使用要求的机器人导航线。将导航线离散化处理后得到用于机器人跟踪的目标点。本文对比了 PID、模糊控制、纯追踪三种控制方法在果园环境中机器人跟踪

效果，实验结果表明模糊控制在该环境下适应性最好。

## 6.2 研究展望

本文主要对果园环境下运作的轮式滑动转向机器人控制与自主运行。在工作中利用了人工智能，传感器融合，联合仿真等技术，完成了机器人结构设计、机器人理论分析、控制方法研究、总体方法验证。本文工作对户外轮式滑动转向机器人的自主运行提供了一定的理论依据以及实践经验。但是由于户外条件作业情况相对恶劣，果园环境下轮式滑动转向机器人自主运行控制还存在以下问题亟待解决：

1、本文提出的基于机器人姿态的轮式滑动转向机器人四轮垂直载荷估计方法在铺装平整坡道运行时，估计精度较高。但是果园路况起伏不定，机器人运行时可能出现悬空或半悬空状态，这种情况的垂直载荷实时估计方法本文未予讨论。如果要更加精确的对果园条件下的机器人运行加以控制，这一情况应当展开分析研究。

2、对于机器人自主运行问题，本文在标准化种植条件下不考虑路面具有深坑，大型障碍物等情况，但果园实际情况可能会出现以上问题。因此，为完全实现机器人自主导航，应考虑通过图像、多线激光雷达传感器对路面进行识别检验。当遇到不可同行障碍时，应设计局部避障功能，使机器人运行安全性得到保障。

## 参考文献

- [1] 李之振.中国水果进出口现状分析[J].物流工程与管理,2022,44(09):137-139.
- [2] 马永明.果园机械化生产技术现状及装备特征[J].农机使用与维修,2023,No.317(01):59-61.DOI:10.14031/j.cnki.njwx.2023.01.016.
- [3] 封永.基于激光雷达传感器的农业机器人车辆地头转向研究[D].南京农业大学,2016.
- [4] 周济.智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J].中国机械工程,2015,26(17):2273-2284.
- [5] 李金华.德国“工业 4.0”与“中国制造 2025”的比较及启示[J].中国地质大学(社会科学版),2015,15(05):71-79.DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.2015.05.009.
- [6] 李鑫,曹少波,杨欣,等.适于机械化作业的葡萄栽培技术规程研究[J].中国农机化学报,2017,38(2):120-123.
- [7] 何亚飞.农业机械自动化技术要点及优化应用研究[J].河北农业,2022,No.332(11):72-73.
- [8] 陈光明,张圆,周瑾等.多功能农业移动平台机器人设计与应用[J].农机使用与维修,2022,No.313(09):42-47.DOI:10.14031/j.cnki.njwx.2022.09.014.
- [9] 李雪峰,李涛,邱权等.果园移动机器人自主导航研究进展[J].中国农机化学报,2022,43(05):156-164.DOI:10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2022.05.023.
- [10] 郁录平,张志友.滑移转向装载机的转向原理分析[J].工程机械,2001(06):24-26+64.
- [11] 张国君,杨世文.四轮车辆滑移转向结构条件分析[J].拖拉机与农用运输车,2007(04):22-24.
- [12] 任城钰,郑玉龙,孙致富,等.四轮滑移转向机器人行走分析[J].工程机械,2022,53(05):109-112+13.
- [13] 丁亮,高海波,郭军龙,等.轮式移动机器人滑转和滑移问题的地面力学解析[C]//中国自动化学会控制理论专业委员会(Technical Committee on Control Theory,Chinese Association of Automation),中国系统工程学会(Systems Engineering Society of China).第三十一届中国控制会议论文集 C 卷.[出版者不详],2012:8.
- [14] 郭晓林,潘家平,于诏城.轮式车辆低速稳态滑移转向特性研究[J].农业装备与

- 车辆工程,2012,50(12):27-30.
- [15] 闫永宝,张豫南,颜南明,等.六轮独立驱动滑动转向车辆运动控制算法仿真研究[J].兵工学报, 2013, 34(11):1461-1468.
- [16] 张高峰. 轮式滑移装载机转向过程分析及仿真[D].太原科技大学,2014.
- [17] 陈晋市,郑琦,霍东阳,王禹琪,韩亚方.桥荷分配对轮式滑移装载机行走系统性能的影响 [J]. 吉林大学学报 (工学版),2020,50(04):1235-1244.DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb20190608.
- [18] 丁东. 小型四轮独立驱动车辆滑移转向控制研究 [D]. 厦门理工学院,2021.DOI:10.27866/d.cnki.gxlyxy.2021.000046.
- [19] 洪濡,胡广地.滑移转向 4WD 车辆直接横摆力矩控制方法研究[J].汽车工程学报,2018,8(02):114-122+129
- [20] Yacoub, M, & Ali, A. "Propulsion Dynamic Requirements Analysis for Multi-Axle Skid-Steer Wheeled Vehicles." Proceedings of the ASME 2020 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Volume 4: 22nd International Conference on Advanced Vehicle Technologies (AVT). Virtual, Online. August 17–19, 2020.
- [21] Jianfeng Liao,Zheng Chen 0004,Bin Yao 0001. Model-Based Coordinated Control of Four-Wheel Independently Driven Skid Steer Mobile Robot with Wheel-Ground Interaction and Wheel Dynamics.[J]. IEEE Trans. Industrial Informatics,2019,15(3).
- [22] 李宣政. 基于滑移率的路面附着系数估计 [J]. 科技视界,2014,No.89(02):7-8+13.DOI:10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2014.02.002.
- [23] 周伟,李军,张世义等.采用极值搜索算法估计附着系数的车辆驱动防滑控制[J].华侨大学学报(自然科学版),2019,40(06):701-706.
- [24] 张晓龙,孙仁云,葛恒勇等.基于峰值附着系数变化范围的路面识别研究[J].科学技术与工程,2015,15(11):111-115+124.
- [25] 熊喆,过学迅,裴晓飞等.指数和线性参数化的轮胎-路面纵向附着条件实时估计方法[J].中国机械工程,2018,29(15):1826-1833.
- [26] 白洋洋.滑移转向轮式机器人的定位方法研究[D].北方工业大学,2019.
- [27] Sedat Dogru,Lino Marques. Power Characterization of a Skid-Steered Mobile Field Robot with an Application to Headland Turn Optimization[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems,2019,93(3).

- [28] 张家旭,周时莹,赵健等.基于非线性干扰观测器的车轮滑移率跟踪控制[J].华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(10):44-49.DOI:10.13245/j.hust.201008.
- [29] 李静,王晨,张家旭.基于自适应快速终端滑模的车轮滑移率跟踪控制[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(01):169-176.
- [30] Liu Fangxu et al. Slip-Aware Motion Estimation for Off-Road Mobile Robots via Multi-Innovation Unscented Kalman Filter[J]. IEEE Access, 2020, 8 : 43482-43496.
- [31] 鲁浩.基于瞬时转向中心实时估计的滑动转向车辆运动轨迹预测方法研究[D].北京理工大学,2016. DOI:10.26948/d.cnki.gbjlu.2016.000768.
- [32] 李天华,吴增昊,廉宪坤 等. 基于定向摄像头的大拱棚运输车视觉导航研究[J]. 农业机械学报, 201849(S1)8-13.
- [33] 张雄楚, 陈兵旗, 李景彬, 等. 红枣收获机视觉导航路径检测[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 133-140.
- [34] 毕松, 王宇豪. 果园机器人视觉导航行间位姿估计与果树目标定位方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(08): 16-26+39.
- [35] LI Y, WANG X, LIU D. 3D Autonomous Navigation Line Extraction for Field Roads Based on Binocular Vision[J]. Journal of Sensors, 2019, 2019(8): 1 – 16.
- [36] 李秋洁, 丁旭东, 邓贤. 基于激光雷达的果园行间路径提取与导航[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S02): 7.
- [37] 倪江楠. 基于激光导航设施的收割机自动控制系统研究[J]. 农机化研究, 43(2): 4.
- [38] 刘星星, 张超, 张浩, 等. 最小二乘法与 SVM 组合的林果行间自主导航方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 157-164.
- [39] 艾长胜, 林洪川, 武德林, 冯志全. 葡萄园植保机器人路径规划算法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 77-85.
- [40] BLOK P M, BOHEEMEN K V, EVERT F V, 等. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 261 – 269.
- [41] Haidong Wu, K. Guo and Haibin Xu, "Dynamic tire model used in advanced chassis control," 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering, Wuhan, China, 2011, pp. 4957-4961, doi: 10.1109/ICEICE.2011.5776824.
- [42] 梁长飞,李玉光,李子阳等.Magic Formula 轮胎模型动力学性能研究[J].汽车实



- 用技术,2020,45(16):116-119.DOI:10.16638/j.cnki.1671-7988.2020.16.039.
- [43]M. Bian, L. Chen, Y. Luo and K. Li, "Estimation of Maximum Tire-Road Friction Based on Dynamic Model Reconstruction," 2013 International Conference on Mechanical and Automation Engineering, Jiujiang, China, 2013, pp. 224-228, doi: 10.1109/MAEE.2013.63.
- [44]D. Jeong, S. Kim, J. Lee, S. B. Choi, M. Kim and H. Lee, "Estimation of Tire Load and Vehicle Parameters Using Intelligent Tires Combined With Vehicle Dynamics," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 70, pp. 1-12, 2021, Art no. 9502712, doi: 10.1109/TIM.2020.3031124.
- [45]J. Kim, C. D. Crane and J. Kim, "Development of the Autonomous Navigation Algorithm based on the Geometric Method for Skid Steering Vehicles: Convergence of Skid Steering and Pure Pursuit Methods Using Compensation Coefficients," 2022 22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Jeju, Korea, Republic of, 2022, pp. 1996-2001, doi: 10.23919/ICCAS55662.2022.10003669.