**东 北 大 学**

**机械工程与自动化学院**

**硕士学位论文开题报告**

**及论文工作计划书**

学 号： 2200341

姓 名： 陈培泽

专 业： 机械电子工程

导 师： 陆志国

基层组织： 机械电子工程研究所

论文题目： 轮圈腿式平衡机器人多模态运动控制研究

考核时间： 2023 年 11 月 29 日

填表说明

1、本表应在导师指导下如实填写。

2、学生在开题答辩前一周，将该材料交到所在基层学术组织。

3、按有关规定，没有完成开题报告的学生不能申请论文答辩。

4、全文正文均用小四号宋体，单倍行距，段前段后间距为 0，如果页数不够，可以整页扩页，其他格式要求参见《东北大学硕士学位论文排版打印格式》

|  |
| --- |
| 一、前期工作基础（本节可以整页扩页）  课程学习及选题开题阶段，在导师指导下从事研究工作总结（不少于2000字）  第一学年，学习《数值分析》以及《最优化方法与理论》两门数学基础学科，并在指导教师的指导下，选修了《机器人学》、《机械工程大数据分析方法》、《智能制造技术》、《Python语言科学计算与数据处理》等课程，并取得了不错的成绩。在《机器人学》课上学习了相关的串联机械臂的关节表示方法和运动模型，为后续机械臂的控制算法奠定了理论基础；在课程学习期间对机器人技术产生了浓厚的兴趣，并对机器人相关的技术有了一定的了解。机器人技术门类纷繁复杂，并且每一种都至关重要。在课程学习过程中，学习到了一些经典的控制算法，一些新型传感器的应用，机器人控制编程等。  课余时间，积极到实验室学习，完成导师布置的任务。在导师的指导下，使我对仿生机器人产生了兴趣。一方面查找了很多的国内外与机器人相关的文献，学习与机器人相关的设计制作方法和仿真方法；另一方面，根据老师指导的学习的路线，进行逐步学习相关基础知识：   1. 学习《机器人学导论》《移动机器人学》等相关基础知识。   《机器人导论》是一部经典的机器人学入门的书籍。第一章是机器人学的介绍，介绍一些背景资料、基本思想和书中所使用的符号，并概述后面各章的内容。第二章包括描述三维空间中的位置与姿态的数学知识。这是极为重要的内容：通过定义，机械操作本身与周围空间的移动物体(工件、工具、机器人本身)联系起来。需要用一种易于理解并且尽可能直观的方式来描述这些动作。第三章和第四章讨论机械操作臂的几何问题，介绍机械工程学科中的运动学分支，这个分支研究运动但不考虑引起这种运动的力。在这两章里，讨论操作臂运动学，但把研究范围限定在静态定位问题上。第五章将运动学的研究范围扩展到速度和静力方面。第六章开始研究引起操作臂运动的力和力矩。这是操作臂动力学问题。第八章涉及许多与操作臂的机构设计有关的问题。例如，设计多少关节是适宜的，关节的类型应是什么，它们需要如何布局。第九章和第十章研究操作臂的控制方法(通常利用计算机)，使其准确地跟踪预定设计的空间轨迹。第九章研究线性控制方法，第十章将研究扩展到非线性领域。第十一章讨论操作臂的力控制，即研究如何控制由操作臂施加力，这种控制模式在操作臂接触周围环境的情况下非常重要，比如操作臂用海绵擦窗户。第十二章概述机器人编程方法，特别是机器人编程系统中所需的基本元素以及与工业机器人编程相关的特殊问题。第十三章介绍离线仿真和编程系统，其中描述人与机器人接口的最新进展。   1. 通过网络课程学习嵌入式相关知识。   主要学习的内容是以STM32单片机为硬件平台，Keil 5 IDE作为软件编程平台，使用C和C++语言进行单片机相关实验，包括单片机时钟学习，IO输出学习，PWM学习，串口、IIC、SPI、CAN、485等通信协议学习。最终可以实现独立完成硬件布线，软件框架搭建的任务。我的课题最后将使用RoboMaster C型开发板作为机器人主控完成电机控制数据获取等任务，所以也对C型板进行了相关学习，包括C型板的原理图以及硬件外设分布，了解有关IMU解算的相关知识，为后续的位姿控制打下基础。   1. 学习Webots仿真软件。   Webots是一款开源的多平台机器人仿真软件，为机器人的建模、编程和仿真提供了完整的开发环境。Webots由Cyberbotics公司开发，是一款优秀的开源多平台机器人仿真软件，为机器人的建模、编程和仿真提供了完整的开发环境。Webots开源免费、简单易用、文档齐全并且支持多种类型的机器人。Webots内核基于开源动力学引擎ODE和OpenGL，可以在Windows、Linux和macOS上运行，并且支持多种编程语言(C/C++，Python，Java，MATLAB)。Webots支持多种不同类型的机器人仿真，如工业机械臂，轮式机器人，足式机器人，履带式机器人，汽车，无人机，水下机器人，航天器等。Webots支持多种虚拟传感器，如相机，雷达，力传感器，位置传感器，陀螺仪，惯性单元，GPS等。Webots还支持多种复杂环境的模拟，如室内，室外，崎岖路面，空中环境，水下环境等。   1. 学习MATLAB以及Simscape仿真。   Simscape 可让在 Simulink 环境中迅速创建物理系统的模型。借助 Simscape，可以基于物理连接建立可直接与模块图和其他建模范式集成的物理组件模型。通过将基础组件组合为原理图对电机、桥式整流器、液压作动器和制冷系统等系统进行建模。Simscape 附加产品提供了更多复杂组件和分析功能。Simscape 可帮助开发控制系统并测试系统级性能。基于 MATLAB 的 Simscape 语言可以使用文本编写物理建模组件、域和库，进而创建自定义组件模型。可以使用 MATLAB 变量和表达式参数化模型，并使用 Simulink 设计物理系统的控制系统。   1. 通过学习《自动控制原理》相关教学文章学习控制相关知识。   主要学习的内容有动态系统建模-传递函数：以传递函数的形式描述物理系统；动态系统建模-状态空间方程：以状态空间方程描述物理系统并了解状态空间方程与传递函数之间的关系；基于传递函数的控制器设计-比例积分控制以及基于状态空间的控制器及观测器的设计，这就是常用的PD控制器以及LQR控制器的基本思想，并在MATLAB中进行初步算法学习及验证：完成了基于PD控制的倒立摆模型以及基于LQR控制的倒立摆模型的仿真。 |
| 二、选题依据（本节可以整页扩页）  课题背景、选题依据、课题研究目的、理论意义和应用价值（工学硕士）/工程背景和实用价值（专业学位硕士）（不少于1000字）  2.1 课题背景  目前，各国研究机构和学者对两轮机器人的研究产生了浓厚的兴趣，一方面由于其机械结构特有的实用性和功能性，另一方面，两轮自平衡机器人系统作为一种复杂的欠驱动非线性系统对系统控制上提出了更大的挑战。早期的两轮自平衡机器人的研究主要集中在功能实现上包括动力学建模、控制策略以及系统设计。随着两轮自平衡技术的不断成熟，各国技术人员基于自平衡技术设计出了结构日趋复杂、功能更加多样、应用场景也更为丰富的两轮自平衡机器人。目前主流的两轮机器人主要有两种构型，一种为依靠机身前倾改变重心相对于机器人与地面接触点的位置获得加速度方式的传统平衡机器人，该机器人的优点是构型简单，缺点是加速度由自身结构前倾角度决定，且无法跨越较为复杂的地形，翻倒后难以自恢复；另一种为轮腿式双轮机器人，该构型机器人依靠机器人腿部的移动改变重心位置提供加速度，该结构的优势为拥有应对多种地形的能力，缺点是机器人结构复杂，腿关节大多数需要两个电机控制运动，成本较高，同时也存在翻倒后难以自恢复的问题。  2.2 选题依据  为应对复杂的两轮平衡机器人工作环境，需要研制一款具备跨越复杂地形（包括斜坡，崎岖路面，台阶等）的能力，并且有翻倒后自恢复能力的两轮机器人结构。因此，本课对一种新型结构轮圈腿式平衡机器人，具有多模态运动形式，可以跨越多种地形。对该构型进行仿真模型搭建，进行运动学和动力学建模，运动控制算法验证，根据仿真结果绘制三维模型并搭建实物模型实验平台，在实物平台上进行控制算法验证。  2.3 研究目的  针对目前主流的两种双轮移动机器人存在的不足点：前倾重心式双轮机器人难以通过复杂崎岖环境，加速时需旋转机体，轮腿式双轮机器人所需的结构复杂，使用的电机数目多，和二者共有的翻倒后难以自恢复平衡状态的问题。提出一种新型结构的轮圈腿式的双轮平衡机器人。该构型的轮圈腿式平衡机器人拥有通过复杂地形的能力，包括斜坡，崎岖路面，台阶的能力，其结构与电机数目相较于轮腿式机器人要更节能和有更低的制作成本。针对新构型的机器人，需要对其进行运动学和动力学建模分析，对比不同控制算法的特性以及控制效果，选择适合的控制算法，使其拥有完成多模态的运动，模态切换，以及针对不同地形进行模态决策的能力。  2.4 理论意义与应用价值  该课题提出了一种新型的双轮移动机器人结构，使其在拥有通过崎岖路面，上下台阶能力的同时，结构较其他拥有此能力的机器人更为简单，成本更低。该拥有通过复杂地形能力的双轮机器人可以在许多人类生活场景甚至人类难以抵达的环境允许，可以帮助人类处理不同场景下的问题以及完成更多的任务。同时通过研究对该构型的运动学和动力学建模，可以提供一种与其简化模型同类机器人的建模思路。通过尝试不同的控制思路：PID算法，LQR算法，MPC算法，强化学习算法，可以比较出各种算法对于此结构机器人的优劣势，同时比较出更适合该种类机器人的控制方法。 | |
| 三、文献综述（本节可以整页扩页）  国内外研究现状、发展动态描述（不少于1000字）；所阅文献的查阅范围及手段，附参考文献（不少于10篇，其中近3年文献不少于5篇，英文文献不少于3篇，全部按照标准格式列出，并在文中顺序标注）  移动机器人作为机器人的重要组成，在地震洪灾、军事冲突、恐怖袭击、核 爆矿难、野外探索等事件现场发挥了重要作用[1]。在执行这些特种任务中，移动 机器人首先面对的就是未知、复杂的地形环境，在这些人类难以进入或无法靠近的恶劣现场作业，移动机器人首先应具备灵活机动性和强越障性能[2]，这也是快速获取和传递现场情报方便后方人员做出评判的必要条件。  双轮自平衡机器人是一种特殊的轮式移动机器人,其概念是20世纪80年代提出来的，属于轮式机器人中的一种，并且结合了自主移动的思想[3]。其工作原理源于倒立摆的控制原理，经过对其进行动力学模型建立和分析，可以知道其系统是非线性、强耦合、多变量和自然不稳定的系统，是检验各种控制理论的理想模型，成为了国内外学者研究的热点。由于这种机器人可以自我平衡，扩展了它适应地形变化的能力，运动灵活、行驶速度和倾斜角度可以调节。通过两轮的差动输入可以实现零回转半径和U型回转等优点[4]。并且有着结构简单、运动灵活、适合在狭小和危险的空间内工作，因此，在于民用、军用上都有着广泛的应用前景。所以，双轮自平衡机器人的研究是一个有很强的教学价值和广泛的市场应用价值。  1995 年美国著名发明家Dean Kamen开始秘密研制一种新型的方便快捷的两轮交通工具“Segway”,直到 2001 年 12 月这项属高度机密的新发明才被公布出来。该项发明的成功使两轮机器人控制技术成为全球机器人控制技术的研究热点[5]。 Segway是世界上第一部能够自平衡的两轮电动车，时速高达20km/h。Segway没有刹车和加速系统，电动车的运行状态完全由驾驶者重心位置决定。Segway的控制系统由陀螺仪组（五个惯性陀螺仪）、倾角传感器（两个倾角计）、斜坡感应器、光学传感器、嵌入式计算机和电机构成。平衡时每 10ms检测一次驾驶者重心位置，以此作为控制器的输入。电动车具有很强的自平衡能力，能在湿漉的地面和雨雪天气时使用。现在Segway已经形成了成熟的商业产品，并推出一系列各种用途产品，在很多领域得到了应用，如图所示。   |  | | --- | | Segway | | 图3.1 Segway平衡机器人 |   轮式和腿式机构的集成已被证明是移动机器人在各种场景中克服复杂地形的有效解决方案。轮子效率很高，可以在平坦的表面上快速穿越，而腿更适合处理非结构化的地形，尽管它们更耗能。轮式双足机器人（WBRs）利用轮子和腿的优势，允许在不同的人类生产和生活环境中灵活移动，包括楼梯、自动扶梯和斜坡。为了获得全地形的移动性，需要在运动控制器上投入更多的精力来处理机器人动力学的欠驱动、高耦合和非线性[6]。  2019年由瑞士苏黎世联邦理工学院自治系统实验室在ICRA会议上展出的双轮腿式平衡机器人Ascento，该机器人可以在平地上具有快速稳定的机动性，同时可以动态的越过障碍物。Ascento提出的系统由两条腿组成，末端是主动轮。如图1所示，支腿连接到容纳所有电子设备的机体上。通过驱动安装在身体臀部的相应电机，每条腿都可以独立地伸展和收缩。这样，系统的总高度可以在31厘米到66厘米之间调节。腿机构的目标是尽可能地分离稳定和跳跃控制。这是通过一个三杆连杆实现的，该连杆近似于车轮垂直于地面的线性运动，如图2所示。通过使直线穿过系统的质心，腿部运动决定了不会引起身体旋转的跳跃轨迹。Ascento的硬件系统由一个峰值扭矩40Nm的关节电机以及一个峰值扭矩3.5Nm的轮毂电机，使用i7 Intel NUC作为主处理单元，同时配有惯性测量单元IMU以及微控制器，两个Tof距离传感器安装在两个轮子旁边用于触发跳跃[7]。目前,Ascento已形成了成熟的商业产品并在不断更新迭代，在庭院守卫，工厂巡检等方面得到应用。   |  | | --- | | 文献阅读：Ascento—ICRA2019 - 知乎 | | 图3.2 Ascento平衡机器人 |   中国科学技术大学研制出了基于倒立摆原理且具有自主知识产权的两轮自平衡电动车 Free Mover，控制策略为模糊控制[8]。它是一种两轮式左右平行布置结构的自动平衡控制系统。首先建立电动车系统的精确数学模型，然后通过陀螺仪、倾角仪、光电编码器以及各类传感器来采集电动车的实时数据，最后通过车体内的嵌入式 CPU 和相应控制算法，对采集的数据进行、分析和处理，控制电机向着小车倾倒方向运动从而实现车体平衡。  2004 年，台湾国立中央大学成功使用模糊控制研制了自己的两轮自平衡机器人[9]。该学校的智慧型控制实验室使用美国国家仪器生产的 DSP 作为核心控制芯片，通过编程控制处理器分析编码器得到的实时数据来使小车保持平衡，进一步通过滤波器技术优化信号是机器人的稳定性得到提高，有着很好的抗干扰能力。  2021年由腾讯机器人在西安的ICRA会议中展出的双轮腿式平衡机器人Ollie是一种由并联式结构组成机器人腿部关节的平衡机器人。Ollie机器人在会上展出其可以通过调整自身高度通过不同限高的通道，同时通过辅助机构可完成后空翻跳过沟壑的动作。Ollie的结构是由机体，腿部结构，腿部结构包括两个主动臂和两个从动臂，主动臂一端与关节驱动电机相连，一端与从动臂相连，末端为轮式动力机构。由机体，两支主动臂和两支从动臂组成五连杆结构，通过关节驱动电机转动改变机体重心位置，利用轮腿机构平衡机体，实现移动跳跃等动作。Ollie所使用的控制算法应用基于输出调节和线性二次调节器（LQR）方法的线性反馈控制器保证机器人在地面上站立，同时考虑模型的非线性特性并获得更大的稳定与使用基于互连和阻尼分配-基于无源性的控制（IDA-PBC）方法的非线性控制器被开发用于在更一般的场景中控制机器人[10]。除此之外，Ollie团队采用全身控制（WBC）框架，提高多自由度机器人在任务空间中的灵活性，应用基于学习的自适应技术辅助WBC，完成在各种地形下的多个动作[11]。   |  | | --- | | “意念控制”生活，还远吗 - 封面新闻 | | 图3.3 腾讯Ollie平衡机器人 |   参考文献  Stephan K D, Michael K, Michael M G, et al. Social implications of technology: The past, the present, and the future[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(Special Centennial Issue): 1752-1781.  梁玉鑫.滑模变结构控制在两轮自平衡机器人系统中的应用研究[D].哈尔滨理工大学[2023-11-11].  李威.两轮自平衡机器人控制系统研制[D].哈尔滨：哈尔滨工业大学，2005．  常春阳.两轮电动车行走机构控制的相关问题研究[D].洛阳：河南科技大学，2005．  徐贺, 谭大伟, 张振宇. 崎岖地面上移动机器人构型发展综述[J]. 2009.  J. Yu, Z. Zhu, J. Lu, S. Yin and Y. Zhang, "Modeling and MPC-Based Pose Tracking for Wheeled Bipedal Robot," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 8, no. 12, pp. 7881-7888, Dec. 2023.  V. Klemm et al., "Ascento: A Two-Wheeled Jumping Robot," 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, QC, Canada, 2019, pp. 7515-7521.  陈峰．滑模变结构控制理论及其在机器人中的应用研究[D]．无锡：江南 大学（硕士学位论文），2008：7-9．  阮晓钢，刘江，狄海江等．两轮自平衡机器人系统设计、建模及LQR控制 [J]．现代电子技术，2008：57-60．  S. Wang et al., "Balance Control of a Novel Wheel-legged Robot: Design and Experiments," 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Xi'an, China, 2021, pp. 6782-6788.  J. Zhang et al., "An Adaptive Approach to Whole-Body Balance Control of Wheel-Bipedal Robot Ollie," 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Kyoto, Japan, 2022, pp. 12835-12842. | |
| 四、研究内容（本节可以整页扩页）  1．研究构想与思路、主要研究内容及拟解决的关键问题（不少于1000字）  2．拟采取的研究方法、技术路线、实施方案及可行性分析  4.1.1 研究构想与思路  本课题着眼于针对轮圈腿式机器人的运动学、动力学建模，使用状态空间的形式描述机器人系统，在仿真环境中使用控制算法对构建的仿真模型进行控制算法验证，完成在不同环境下的运动算法，最后在实物平台上进行实物实验，在真实的物理环境中验证仿真算法，并完成不同地形不同环境下的运动控制。  4.1.2 主要研究内容  ①对轮圈腿式平衡机器人进行运动学和动力学建模。  目前已有初代轮圈腿式平衡机器人的实物模型，以微分代数方程的形式对实物模型进行运动学建模，求出轮圈腿式机器人的正逆运动学表达式，以拉格朗日动力学和牛顿动力学对模型进行动力学建模，求出该机器人系统的状态空间方程。  ②使用求出的状态空间方程在MATLAB中进行LQR算法验证。  在MATLAB中使用系统工具表达轮圈腿式状态空间方程，使用LQR工具箱求解相关系数矩阵。在Simscape仿真环境中搭建简易仿真环境，使用求解的LQR矩阵对机器人模型进行仿真控制，完成LQR算法的验证。  ③在Webots仿真软件中搭建仿真环境，使用C++语言完成LQR算法，书写仿真框架代码。  在Webots中搭建实物的仿真模型，包括物理模型，电机、编码器、惯性测量传感器、距离传感器等电力设备。搭建各种仿真地形，包括台阶，斜坡，崎岖路面等。在Webots仿真环境中，使用C++语言编写仿真框架，实现LQR算法的求解，实现控制机器人在仿真环境中实现全地形运动。  ④对实物模型进行调试，在实物模型上实现的全地形运动。  对实物模型进行电力布线，选择控制板和各类传感器，编写程序完成各电机的控制和各传感器的数据读取与数据融合。通过上位机与下位机通信的形式，实现上位机处理各传感器数据，解算输出力矩，下位机获取各传感器数据，控制电机执行的工作模式。最终在实物模型上实现全地形运动。  ⑤实现机器人对地形的检测及模态切换。  在实物机器人上加装Intel NUC，视觉相机以及激光雷达等感知传感器，使机器人拥有检测环境地形的能力，使用深度学习对地形进行识别，使机器人拥有根据不同地形自主选择工作模态的能力。  ⑥控制算法进行优化，使用MPC+WBC算法完成机器人仿真与实物。  4.1.3拟解决的关键问题  该课题的拟解决的关键问题是，针对新型结构轮圈腿式平衡机器人的动力学建模以及非线性控制。在动力学建模方面，由于轮圈腿式结构为机器人带来了较多自由度，全自由度进行动力学建模模型复杂，如何简化或优化建模过程是重点。在非线性控制方面，由于机器人系统结构的非线性特点以及线性二次最优控制（LQR）的算法特性，需要将非线性系统线性化，即在系统远离平衡点时由于线性化带来的系统误差会变大，系统将变得不准确，需通过非线性控制算法nLQR等进行非线性跟踪控制。为得到更好的控制效果，在完成LQR算法控制后，使用MPC+WBC算法对该模型进行控制。  4.2.1 研究方法  1. 文献研究  通过查阅国内外文献，对目前双轮平衡机器人的发展现状进行研究，了解双轮平衡机器人的运动学和动力学的建模思路，针对双轮平衡模型使用的控制算法，针对非线性系统控制算法。明确本课题的研究目标，即对轮圈腿式平衡机器人的建模和控制算法研究，最终完成轮圈腿式机器人的动力学模型并以状态空间形式表达，使用LQR的控制方法完成机器人多模态的运动控制。  2. 仿真与理论结合  采用理论推到与仿真相结合的形式验证算法可行性。在仿真环境中构建机器人的物理模型以及真实环境的物理模型，在仿真环境中根据动力学建模编写LQR控制模型，完成在仿真环境下对机器人多模态多地形运动的控制。  3. 实物验证  将仿真环境中验证的算法迁移实物，在实物对机器人进行LQR算法调试，完成实物环境中算法的验证。  4.2.2 技术路线与实施方案  1．对轮圈腿式机器人运动学和动力学建模  2. 将动力学模型以状态空间形式表达  3. 在MATLAB Simscape中建立机器人建议模型  4. 使用MATLAB LQR算法模块验证控制思路  5. 在Webots 仿真软件中搭建仿真框架并验证控制算法  6. 将仿真算法迁移实物模型进行验证  7. 在实物模型上进行算法优化   |  | | --- | |  | | 图4.1 拟采用的技术路线 | |
| 五、预期研究成果（本节可以整页扩页）  对所研究的成果进行阐述，同时要对与前文研究内容的相关性及与前人（他人）研究成果的差异性进行描述  本文预期达到的研究成果为：   1. 轮圈腿式机器人的运动学和动力学模型   以模型公式，算法框图的形式表达该机器人的运动学和动力学模型。   1. 轮圈腿式机器人的多模态运动仿真   以仿真流程框架，仿真演示视频形式表达该机器人仿真系统完整性。   1. 轮圈腿式机器人的实物多模态运动控制   以样机模型，测试数据，样机演示视频形式描述该机器人实际控制效果。 | |
| 六、研究条件（本节不允许扩页）  1．所需实验手段、研究条件和实验条件 （如果没有，可以空白）  2．所需经费，包含经费来源、开支预算（工程设备、材料须填写名称、规格、数量） （如果没有，可以空白）  6.1实验手段  主要使MATLAB进行机器人运动学动力学建模。Simscape、Webots软件进行仿真实验。使用Keil IDE软件在STM32单片机开发板编写控制程序进行实物验证。在Intel NUC硬件平台上搭建环境感知系统。  6.2研究条件  MATLAB软件、Webots软件、Keil软件、ROS操作系统。 | |

七、工作计划（本节不允许扩页）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 阶段及内容 | 工作量估计 （时数） | 起止日期 | 阶段研究成果 |
| 1 | 学习机器人学相关课程，查阅轮式机器人的相关资料，学习相关的机器人设计与控制理论知识。 | 900 | 2023.1-  2023.7 | 掌握机器人学的基础知识。 |
| 2 | 查阅相关文献资料及书籍，学习相关专业知识，了解双轮式平衡机器人的相关知识。 | 300 | 2023.8-  2023.9 | 确定课题。 |
| 3 | 查阅文献，完成文献综述，学习相关技术，撰写开题报告。 | 300 | 2023.10-  2023.11 | 完成开题内容。 |
| 4 | 使用MATLAB，Webots软件进行机器人运动学、动力学建模，在仿真环境中验证算法。 | 750 | 2023.12-  2024.4 | 完成建模仿真相关内容 |
| 5 | 搭建实物模型，为实物模型进行电力布线，传感器选型，完成单片机对电机的控制以及传感器数据获取。 | 300 | 2024.5-  2024.6 | 完成机实物机器人平台框架搭建 |
| 6 | 在实物实验平台上迁移控制算法，完成实物平台在不同地形下的多模态运动。 | 900 | 2024.7-  2025.1 | 在实物平台上验证控制算法及算法优化 |
| 7 | 总结实验数据材料，论文撰写。 | 750 | 2025.2-  2025.6 | 完成毕业论文，完成答辩 |