

东 北 大 学
机械工程与自动化学院

硕士学位论文
中期检查报告

学 号： 2200341

姓 名： 陈培泽

专 业： 机械工程

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： 2024 年 10 月 28 日

硕士学位论文中期检查报告填写要求

一、硕士学位论文的中期检查是加强研究生论文工作过程管理的重要环节，是对研究生学位论文工作的阶段性检查。

二、硕士学位论文中期检查报告由研究生本人如实填写，首先由导师对报告内容进行审核并给出评价，然后由考核小组给出综合评价意见，最后由基层学术

组织统一交学院教学办审查备案。学院对各个基层学术组织按 20%的比例抽查硕士学位论文中期检查报告。

三、中期报告应包括下列主要内容

1.主要研究内容及实际进展情况概述。
2.目前已完成的研究工作、创新点及成果（重点介绍本人已独立完成的具体研究内容、创新点及取得的成果，切忌泛泛地将某某理论、原理、方法之类内

容填充在此部分，列出主要参考文献 30 篇以上，其中外文文献不少于三分之一；

本部分不得少于 4000 字）。

3.存在的问题及可能的解决思路。

4.后期拟完成的研究工作及进度安排。

5.如实际研究工作存在与开题报告内容不相符的部分，请说明其原因。

6.培养方案中要求的学术研究成果完成情况。

7.按期完成学位论文的可能性。

8.主要参考文献。

四、排版要求

报告内容须按《东北大学硕士学位论文排版打印格式》排版。

提 纲

1. 中期报告计划的主要研究内容及实际进度情况概述。
2. 目前已完成的研究工作、创新点及成果（重点介绍本人已独立完成的具体研究内容及取得的成果，切忌泛泛地将某某理论、原理、方法之类内容填充在此部分，列出主要参考文献 30 篇以上，其中外文文献不少于三分之一；本部分不得少于 4000 字）。
3. 存在的问题及可能的解决思路。
4. 后期拟完成的研究工作及进度安排（包括下一步的研究内容和研究思路、研究进度安排、拟取得的预期成果及其可行性分析）。
5. 如实际研究工作存在与开题报告内容不相符的部分，请说明其原因。
6. 培养方案中规定的学术研究成果完成情况（如完成，请说明完成的条款，其中论文、发明专利、软件著作权等，须按《东北大学硕士学位论文排版打印格式》参考文献格式列出；如还未完成，需说明在学位论文送审前能否完成）。
7. 按期完成学位论文的可能性。
8. 主要参考文献。

目 录

第 1 章 主要研究内容及实际进度	1
1.1 主要研究内容	1
1.1.1 机器人运动学、动力学及状态空间方程推导	1
1.1.2 机器人仿真平台搭建及运动控制算法验证	1
1.1.3 机器人样机平台搭建及运动控制	1
1.2 实际进度概述	2
第 2 章 已完成的研究工作、创新点及成果	3
2.1 主要研究工作	3
2.1.1 轮圈腿式平衡机器人运动学及动力学推导	3
2.1.2 轮圈腿式平衡机器人控制算法设计	5
2.1.3 轮圈腿式平衡机器人仿真平台搭建	9
2.1.4 轮圈腿式平衡机器人实物平台搭建	10
2.2 课题创新点及成果	12
2.2.1 课题创新点	12
2.2.2 课题成果	12
第 3 章 存在的问题及可能的解决思路	13
3.1 存在的问题	13
3.2 可能得解决思路	13
第 4 章 后期拟完成的研究工作及进度安排	15
4.1 后期拟完成的工作	15
4.2 后期进度安排	15
第 5 章 实际研究工作存在与开题报告内容不相符的部分	17
第 6 章 培养方案中规定的学术研究成果完成情况	19
第 7 章 按期完成学位论文的可能性	21
参考文献	23

第 1 章 主要研究内容及实际进度

轮圈腿式平衡机器人具有较高的机动性以及较强的地形适应能力,在户外探索,工厂巡检等领域具有广阔的应用场景。本课题提出一种新型的轮圈腿式平衡机器人结构,通过对该构型机器人进行控制算法设计,可以实现坐姿、站姿、跳跃、上台阶、翻倒恢复的多模态运动。在基于 MATLAB Simscape 和 Webots 机器人仿真平台的理论验证后,搭建实物样机平台进行实验验证。

1.1 主要研究内容

1.1.1 机器人运动学、动力学及状态空间方程推导

本课题是针对轮圈腿式平衡机器人的运动控制研究,机器人的运动学与动力学关系是设计控制算法的基础。本课题针对于轮腿结合式的平衡机器人,选择了牛顿欧拉动力学方法,通过定义状态空间方程的状态变量,结合机器人运动学公式,推导出机器人的状态空间方程,为后续基于模型的线性二次调节建立模型基础。

1.1.2 机器人仿真平台搭建及运动控制算法验证

本课题选用的仿真平台为 MATLAB Simscape 和 Webots 这两个仿真平台,在两个平台上基于线性二次调节器 (Linear Quadratic Regulator, LQR),设计机器人控制算法,并在仿真平台中实现机器人多模态运动。由于该算法最后需迁移至嵌入式运算平台,基于 Webots 放置平台,搭建了一套可实现仿真环境与实物平台切换的控制框架,便于后期算法调试。

1.1.3 机器人样机平台搭建及运动控制

本课题根据仿真结果对轮圈腿式机器人进行实物样机迭代并搭建。在实物样机搭建过程中进行了电机选型,传感器选型。将实物平台调试过程,通过 LQR 算法实现机器人的平衡控制,完成坐姿、站姿、跳跃、上台阶和翻倒恢复的多模态运动控制。并通过零力矩点思想改善机器人转向重心规划,通过设计卡尔曼观

测器，解决机器人的打滑问题。

1.2 实际进度概述

- (1) 已完成轮圈腿式平衡机器人运动学及动力学公式验证。
- (2) 已完成轮圈腿式平衡机器人运动控制算法设计。
- (3) 已完成轮圈腿式平衡机器人仿真平台搭建并验证控制算法。
- (4) 已完成轮圈腿式平衡机器人实物样机平台搭建。

第 2 章 已完成的研究工作、创新点及成果

2.1 主要研究工作

2.1.1 轮圈腿式平衡机器人运动学及动力学推导

对于轮圈腿式平衡机器人，我们使用了基于模型的控制方法，所以在此之前，我们先构建机器人的状态空间方程以便于我们表达模型。轮圈腿式平衡机器人共有四个电机分别驱动机体的俯仰运动和外轮的旋转运动。俯仰电机通过驱动链轮 1，链轮 1 与链轮 2 之间采用链传动，使机体绕旋转轴运动，通过控制俯仰电机，可以控制机体的俯仰角。外轮驱动电机通过轴将扭矩传递到外轮的内齿轮中，外轮通过一组齿轮内啮合驱动外轮圈转动，为机器人提供前进驱动力。

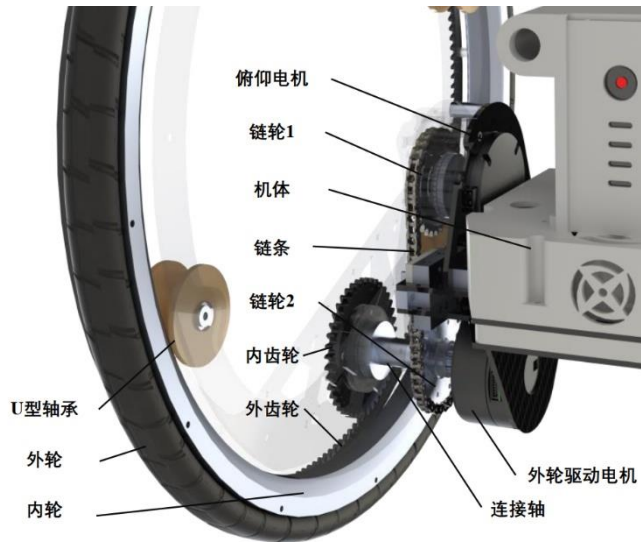


图 2.1 轮圈腿式平衡机器人结构示意图

Fig. 2.1 Schematic diagram of the structure of a rim-legged balancing robot

由于机器人内部传动较为复杂，在进行机器人运动学及动力学分析的过程中，通过将机器人抽象简化，机器人可以分为外轮，内轮，机体三部分。内外轮的齿轮配合可抽象为一组连杆，方便对整体做受力分析。

为减少建模复杂程度，仅在 xoz 平面内对机器人进行运动学和动力学分析。我们定义状态空间方程的状态变量为机器人沿前进正方向 x 的位移为 s ，速度为 \dot{s} ，机器人绕竖直轴 z 的旋转角度 ω ，旋转角速度 $\dot{\omega}$ ，两侧内轮的抬升角度 θ_{bl} 、

θ_{br} , 抬升角速度 $\dot{\theta}_{bl}$ 、 $\dot{\theta}_{br}$, 机体绕旋转轴的俯仰角度 φ , 角速度 $\dot{\varphi}$ 。各变量的正方向均在图 2.2 中表示。各状态变量写作向量形式为： $X = [s \ \dot{s} \ \omega \ \dot{\omega} \ \theta_{bl} \ \dot{\theta}_{bl} \ \theta_{br} \ \dot{\theta}_{br} \ \varphi \ \dot{\varphi}]^T$ 。机器人的外部输入为四个电机的扭矩, 写作向量形式为： $u = [\tau_{wl} \ \tau_{wr} \ \tau_{bl} \ \tau_{br}]^T$ 。机器人个物理量及坐标系表示如图 2.2 所示。

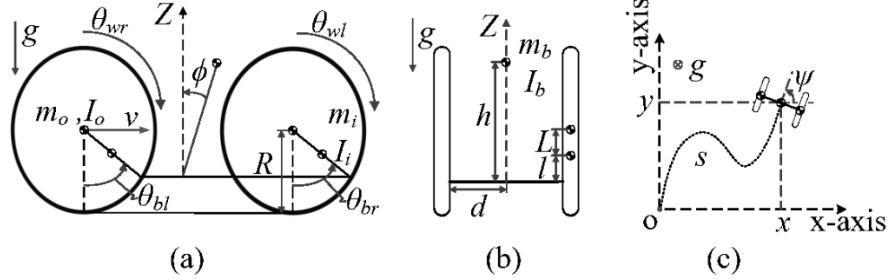


图 2.2 轮圈腿式平衡机器人坐标系设定及各状态变量标识

Fig. 2.2 Coordinate system setting and identification of each state variable of a rim-legged balancing robot

对于外轮, 假设外轮始终与地面接触, 且接触点为 $z = 0$ 点, 对于外轮中心点:

$$x_o = R \cdot \theta_w \quad (2.1)$$

$$z_o = R \quad (2.2)$$

其中 x_o 为外轮中心点在 x 轴方向上的位移, z_o 为外轮中心点在 z 轴方向上的位移, R 为外轮的半径。对于内轮:

$$x_i = x_o + (R - l) \cdot \sin(\theta_l) \quad (2.3)$$

$$z_i = (R - l) \cdot \cos(\theta_l) \quad (2.4)$$

其中 x_i 为内轮质心点在 x 轴方向上的位移, z_i 为内轮质心点在 z 轴方向上的位移, l 为外轮质心到外轮圆心的距离。对于机体:

$$x_b = \frac{1}{2}(x_{il} + x_{ir}) - h \cdot \sin(\varphi) \quad (2.5)$$

$$z_b = \frac{1}{2}(z_{il} + z_{ir}) - h \cdot \cos(\varphi) \quad (2.6)$$

其中 x_b 为机体质心点在 x 轴方向上的位移, z_b 为机体质心点在 z 轴方向上的位移, h 为机体质心到旋转轴的距离。 s 为两轮与地面接触点之间连线的中点, 运动学表示为:

$$s = \frac{1}{2}(x_{ol} + x_{or}) \quad (2.7)$$

机器人绕竖直轴 z 的旋转角度 ω 的运动学可表示为:

$$\omega = \frac{1}{2} \frac{x_{or} - x_{ol}}{d} \quad (2.8)$$

其中 d 为两轮轮距的一半。

将机器人分为外轮, 内轮, 机体三部分并做受力分析, 如图 2.3 所示。

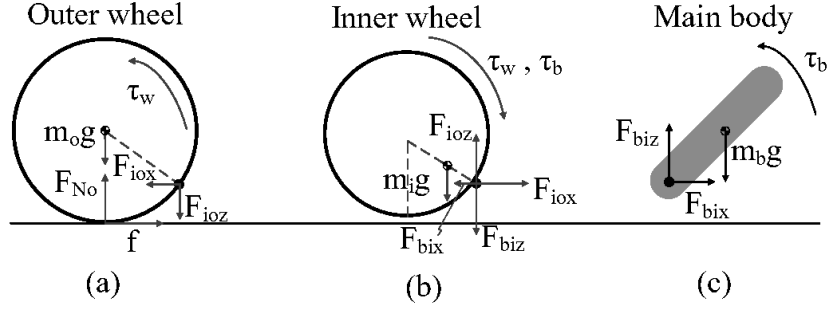


图 2.3 机器人各部分受力分析

Fig. 2.3 Analysis of forces on robot parts

对外轮做受力分析:

$$F_{noz} = F_{ioz} + m_o \cdot g \quad (2.9)$$

$$m_o \cdot R \cdot \ddot{\theta}_w = f - F_{iox} \quad (2.10)$$

$$I_o \cdot \ddot{\theta}_w = f \cdot R - F_{noz} \cdot L \cdot \sin(\theta_l) - F_{ioz} \cdot L \cdot \cos(\theta_l) + \tau_w \quad (2.11)$$

其中 m_o 为外轮质量, I_o 为外轮绕旋转中心的转动惯量.

对内轮做受力分析:

$$m_i \cdot \ddot{x}_l = F_{iox} - F_{bix} \quad (2.12)$$

$$m_i \cdot \ddot{z}_l = F_{ioz} - F_{biz} - m_i \cdot g \quad (2.13)$$

$$I_i \cdot \ddot{\theta}_l = (F_{iox} - F_{bix}) \cdot l \cdot \cos(\theta_l) + (F_{ioz} - F_{biz}) \cdot l \cdot \sin(\theta_l) - (\tau_w + \tau_b) \quad (2.14)$$

其中 m_i 为内轮质量, I_i 为内轮绕质心旋转的转动惯量.

对机体做受力分析:

$$m_b \cdot \ddot{x}_b = F_{bixl} + F_{bixr} \quad (2.12)$$

$$m_b \cdot \ddot{z}_b = F_{bizl} + F_{bizr} - m_b \cdot g \quad (2.13)$$

$$I_b \cdot \ddot{\varphi} = (F_{bixl} + F_{bixr}) \cdot h \cos(\varphi) + (F_{bizl} + F_{bizr}) \cdot h \sin(\varphi) + (\tau_w + \tau_b) \quad (2.14)$$

其中 m_b 为机体质量, I_b 为机体绕质心选择的转动惯量.

因为假设机体仅在 xoz 平面内运动, 可以在机体上得到约束关系:

$$F_{bizl} = F_{bizr} \quad (2.15)$$

因为选用的 LQR 算法针对的是线性表达的状态空间方程, 在进行求解前, 通过在平衡位置附近进行泰勒展开, 将非线性求解问题转化为线性方程组求解问题, 将运动学与动力学联立, 可以得到机器人的状态空间方程表达式:

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (2.16)$$

由于系统输出均由观测或数据融合所得, 所以观测方程表达式:

$$Y = CX + Du \quad (2.17)$$

其中 C 为 I_{10} 的单位矩阵, D 为 0。

2.1.2 轮圈腿式平衡机器人控制算法设计

2.1.2.1 平衡控制算法

由于轮圈腿式机器人在空间中具有六自由度, 而主动控制电机只有 4 个, 属于欠驱模型, 在控制过程中, 需要对多输入多输出的模型进行控制。选择线性二

次型调节器，可以处理多变量控制问题，适合于有多个状态变量和输入变量的复杂系统。它通过状态反馈实现对全局状态的优化，能够同时控制多个状态变量，如位置、速度、角度等。同时，LQR 通过使用精确的系统模型，能够更加精确地调节系统状态，尤其是在欠驱系统中，能够考虑到系统的复杂性，提供更全面的控制。在系统优化方面，通过最小化代价函数（通常是状态误差和控制能量的加权和）来实现全局优化。它能确保控制系统在满足控制性能的同时，尽量减少控制能量的消耗，特别适合控制输入受限的欠驱系统。

对于以及获得了状态空间方程的模型：

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu \\ Y = CX + Du \end{cases} \quad (2.18)$$

其中， $X \in R^{10}, u \in R^4$ ，需要设计全状态反馈控制器：

$$u = -KX \quad (2.19)$$

LQR 的目标是找一组最优控制律 u ，使得系统达到稳定状态，并且对于代价函数：

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (2.20)$$

其中， $Q \geq 0$ ，是状态权重矩阵，反应了我们对状态偏离零的惩罚。 $R \geq 0$ ，是控制权重矩阵，反映了我们对使用控制输入的惩罚。为了最小化代价函数 J ，我们引入动态规划中的 Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 方程。为了求解反馈增益矩阵 K ，需要求解矩阵 P 。通过将最优控制律代入状态方程和代价函数，可以得到矩阵黎卡提方程（ARE, Algebraic Riccati Equation）：

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (2.21)$$

通过数值方法求解 P ，即可得到最优控制律。

系统的主要控制框图如图所示：

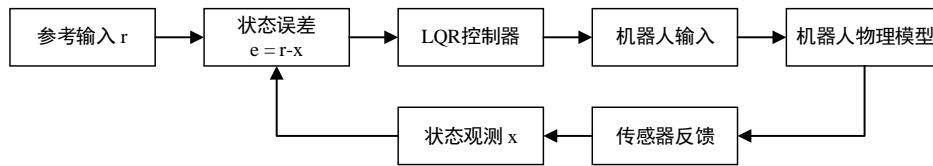


图 2.4 系统控制流程图

Fig. 2.4 System Control Flowchart

在平衡控制中，我们将平衡点设置为机体的 Pitch 轴倾角 φ 为 0，机体重心在两侧外轮与地面接触点连线上，此时机器人可以维持静止平衡。在移动过程中，由于在调节 Q 矩阵时，机体的 Pitch 轴倾角 φ 的误差权重要大于内轮抬升角，当有速度指令时，内轮会向速度方向抬升，为机器人整体提供方向加速度达到目标速度，而 φ 角在此过程中会始终使机体保持竖直状态。

2.1.2.2 站立控制

对于机器人的站立姿态控制,由于机器人的线性化平衡点是以在坐姿状态下的 0 位置为中心进行泰勒展开,当机器人处于站立状态时,机器人内轮抬升角不收敛于坐姿的 0 位置,而是有 $\pm\pi$ 的角度差,线性化模型将变得不再准确。为了解决这一问题,我们将机器人在站立姿势的稳定状态重新设为 0 位置进行模型线性化,同时调节 Q 、 R 矩阵。当机器人执行站姿任务,接近于站姿状态时,切换反馈增益矩阵,即可获得合理的模型控制输出。

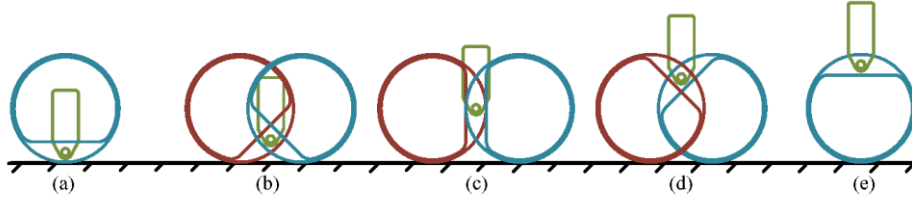


图 2.5 坐姿到站姿的状态切换流程图。从(a)开始进行状态切换,在(d)状态接近站姿设定角度时,切换反馈增益矩阵。

Fig. 2.5 Flowchart of state switching from sitting to standing. State switching is performed from (a), and the feedback gain matrix is switched when the state in (d) approaches the set angle of the standing posture.

2.1.2.3 跳跃控制

轮圈腿式平衡机器人的跳跃动作分为两侧轮交叉跳跃(图 2.6)和两侧轮同向跳跃(图 2.7)。跳跃过程中通过控制两侧内轮抬升角,使机体产生竖直向上的加速度,当机体位于内轮最高点时收腿产生跳跃高度。

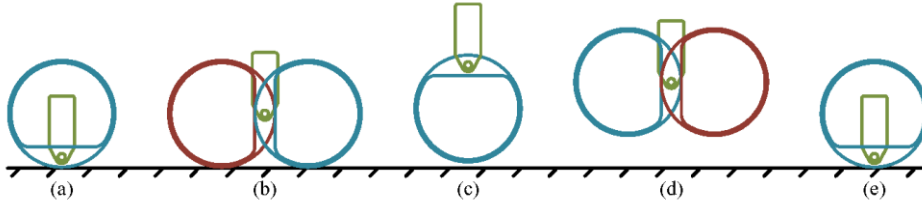


图 2.6 交叉跳跃流程图

Fig. 2.6 Cross-jumping flowchart

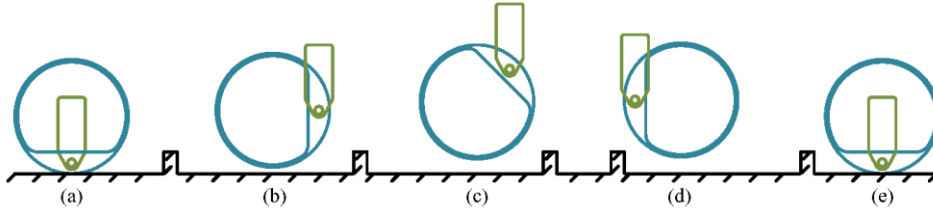


图 2.7 同向跳跃流程图

Fig. 2.7 Isotropic Jump Flowchart

2.1.2.4 横滚轴平衡控制

由于在 LQR 控制建模中仅考虑 xoz 平面的平衡控制,对于机器人的横滚轴 Roll 轴的控制,采用比例微分控制器(PD 控制器)对机器人横滚轴角度进行控

制。在机器人运行过程中，尤其在从坐姿到站姿的过程中，机体的横滚轴对机器人稳定性有很强影响作用。通过 PD 控制器计算出的横滚轴平衡力矩叠加在 LQR 计算出的内轮力矩上，可以有效的保证机器人两侧内轮的高度水平。

2.1.2.5 转向重心补偿控制

在双轮机器人移动转向时，由于向心加速度的作用，对机器人整体分析，机器人的受力平衡点不再是机器人中心，而是随机器人前进速度和转向角速度大小和方向变化的动点。当向心加速度较大时，机器人会产生翻倒的风险，因此参考零力矩点（ZMP）的思路，ZMP 理论多用在足式机器人运动控制中。ZMP 是指地面上的一个特定点，在该点处机器人所受的重力、惯性力和地面反作用力等对该点的力矩之和为零。如果机器人的 ZMP 始终落在其支撑多边形内，那么机器人在动态行走过程中就可以保持稳定。在机器人转向时，机器人通过调整横滚角度将机器人的零力矩点移动至支撑线中点，提高机器人的动态移动转向性能。

2.1.2.6 翻倒恢复

两轮机器人的倾覆情况可分为四种：坐姿、俯卧、跨轮和侧翻。对于前三种翻转姿态，由于重心分布的原因，平衡恢复过程只需将 LQR 计算出的转矩施加到内轮俯仰电机上，外轮电机不输出任何转矩。一旦躯干角度达到一定的稳定值，所有电机的控制都会恢复。这种控制策略最大限度地减少了机器人恢复姿态所需的空间。在横向倾覆的情况下，由于重心分布的原因，大多数双轮平衡机器人在横向倾覆时无法调整重心位置，从而无法在滚动轴方向产生转动力矩。轮圈腿式平衡机器人通过调整两个俯仰电机的角度来实现滚轴方向的旋转，从而产生滚轴方向的旋转趋势，如图 2.8 所示。这也是该机器人配置具有较强稳定性的一个重要因素。

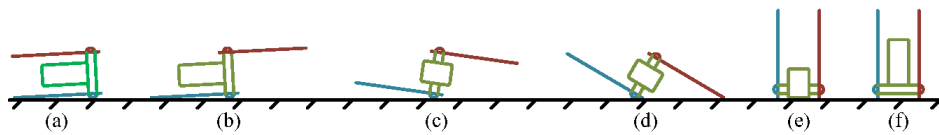


图 2.8 侧向翻倒恢复流程图
Fig. 2.8 Lateral rollover recovery flowchart

2.1.2.7 机器人速度估计

在轮式机器人移动过程中，针对不同的地面表面摩擦系数以及不同的与地面接触角度，通常会出现接触表面无法提供需求摩擦力的情况导致机器人打滑。出现打滑后，机器人外轮会高速旋转，由于机器人的前进速度是由两侧外轮旋转速度计算得到的，当外轮计算速度与机器人实际速度不匹配时，会导致模型计算出

错。为得到更贴近与机器人实际速度的数据，我采用了卡尔曼滤波器对机器人加速度和轮速计进行数据融合，通过调节模型误差和测量误差的标准差，在机器人打滑时，经过卡尔曼滤波后的数据不会产生速度突变。

2.1.3 轮圈腿式平衡机器人仿真平台搭建

在 MATLAB 中，仿真系统分为模型求解和仿真环境两部分。模型求解部分将求得的状态空间方程，使用 LQR 求解器，给定权重矩阵 Q 和代价矩阵 R ，求得反馈增益矩阵。在仿真环境中获取状态空间方程中所需的各状态变量并计算四个电机的输出扭矩。仿真环境使用 Simscape 进行搭建，将机器人模型的 STL 格式文件导入进行模型仿真，如图 2.9 所示。

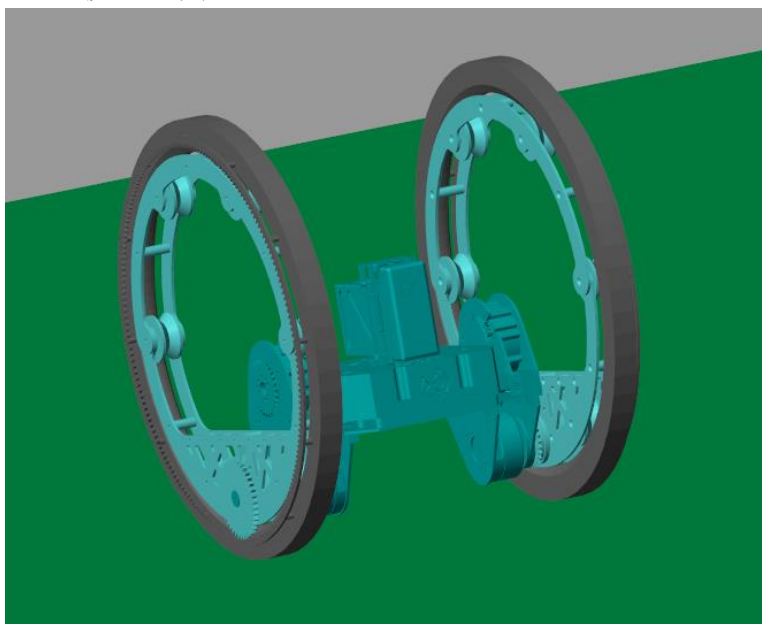


图 2.9 MATLAB Simscape 仿真环境搭建

Fig. 2.9 MATLAB Simscape Simulation Environment Setup

在 Webots 仿真软件中（图 2.10），为方便后期实物调试以及实验验证，搭建了一套通过接口切换可以实现仿真环境和实物环境的统一框架。该调试框架通过遥控器数据作为机器人输入指令设定当前模式以及状态设定值，通过模式选择模块，确定当前执行的运动模式，在动作规划器中，根据当前的模式设定，规划各个动作设定值，将设定值传递至控制算法模块，在控制算法模块中，根据当前的设定值以及机器人的状态反馈，计算电机的输出力矩。

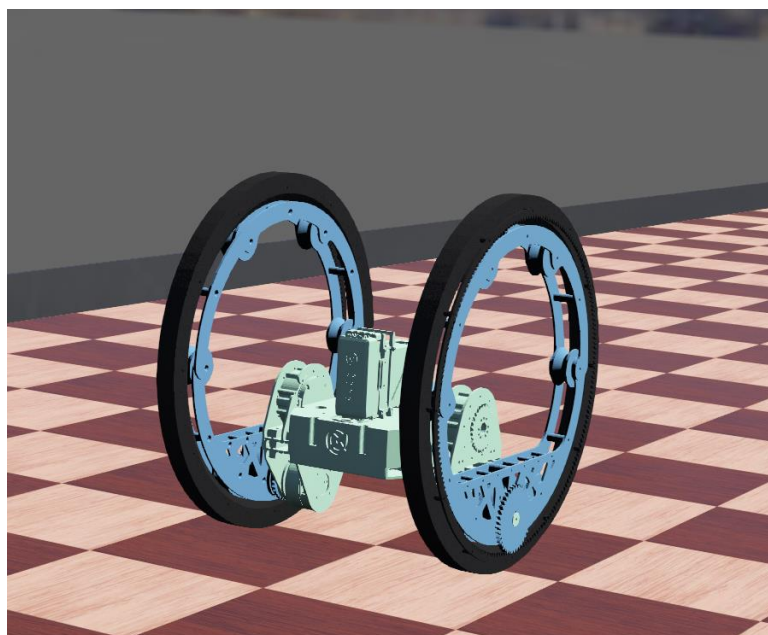


图 2.10 Webots 仿真环境搭建
Fig. 2.10 Webots simulation environment construction

2.1.4 轮圈腿式平衡机器人实物平台搭建

机器人的实物搭建主要包括了机器人的电机选型以及传感器选型。实物样机平台如图 2.11 所示。



图 2.11 实物样机平台
Fig. 2.11 Physical prototype platform

2.1.4.1 电机选型

机器人上的电机选型包括了内轮的俯仰电机以及外轮的驱动电机，在内轮的俯仰电机选择中，根据三维图中估算机器人机体重量为 4.1Kg，我们考虑当机器人水平倒地时将中心机体抬起的转矩，这时力臂长度为 298mm，根据力矩计算

公式可以得到：

$$\tau = m_b \cdot g \cdot h \approx 12.9 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2.22)$$

我们选择的是一款减速电机 CyberGear，电机的额定扭矩为 4Nm，峰值扭矩 12Nm，而单个电机的需求扭矩为 6.5Nm，满足设计需求。

对外轮驱动电机的选择中，在机器人处于交叉站立的姿势下，此时外轮电机需要将内轮与中心机身抬起，内轮与中心机体的重量和为 5.9Kg，力臂长度为 160mm，同时外轮电机通过一组减速比为 1:5 的内齿轮啮合传动，经计算单电机所需扭矩为 0.92Nm，我们选择的一款 MF7015-24V-10T 直流无刷电机，该电机的额定扭矩为 1Nm，峰值扭矩为 2Nm，满足计算需求。

2.1.4.2 控制器与传感器选型

机器人上的主控芯片选择的是 STM32F407IG 系列 MCU，主频 168Mhz，512K 的 Flash 闪存，支持 CAN，USAT，SPI 多种通信协议，支持 FPU 浮点运算单元，拥有较好的浮点运算性能和精度。

机器人上获取姿态信息使用的是带有陀螺仪和加速度计的 BMI088 IMU 模块，加速度计的测量范围为 $\pm 2g \sim \pm 16g$ ，16 位分辨率，角速度计测量范围为 $\pm 125^\circ/\text{s} \sim \pm 2000^\circ/\text{s}$ ，16 位分辨率。通过解算算法可以获得机器人的欧拉角。

机器人上由于内轮没有绝对位置编码器，无法获得内轮抬升角信息，因此选择外置一款磁编码器 AS5048P 以获得内轮电机角度信息。其分辨率为 12 位(4096 个位置)，SPI 高速接口，5V 供电。自主设计绘制的编码器 PCB 如图 2.12 所示。

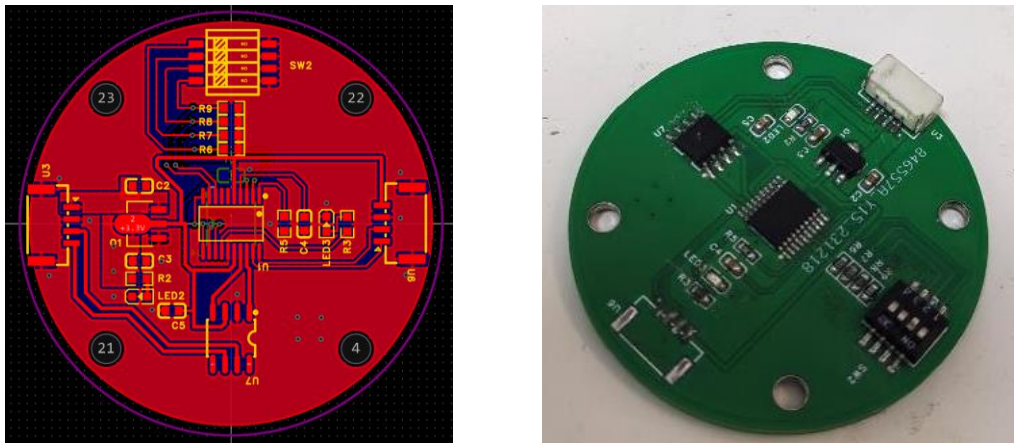


图 2.12 磁编码器模块设计
Fig. 2.11 Magnetic encoder module design

2.2 课题创新点及成果

2.2.1 课题创新点

1.提出一种新型结构的轮圈腿式平衡机器人，该机器人可以通过切换姿态完成坐姿，站姿，跳跃多模态运动，具有上台阶，跨越沟壑等应对复杂地形的能力。在任意翻倒姿势下，可以通过调整身体姿态恢复运行。具有高机动性和高稳定性，多模态运行的特点。对该构型机器人进行运动学和动力学分析，并在仿真环境中搭建实验平台验证机器人的多模态运动能力。

2.针对轮圈腿式平衡机器人构型，设计 LQR 控制算法和 PD 控制算法，使机器人完成坐姿和站姿模态下的行走和模态切换，跳跃动作，上台阶动作，任意姿势翻倒后恢复动作。制作实体样机并完成实物调试，验证机器人构型可行性。

2.2.2 课题成果

- (1) 完成轮圈腿式平衡机器人运动学及动力学分析，推导出状态空间方程。
- (2) 在 MATLAB 及 Webots 中搭建仿真实验平台。
- (3) 设计机器人实物样机传感器模块电路 PCB 及分电 PCB。
- (4) 设计并搭建轮圈腿式平衡机器人实体样机，机器人样机重 9.9Kg, 高 450mm, 宽 379mm, 共 4 个主动电机。
- (5) 编写轮圈腿式平衡机器人实体样机控制程序，完成机器人多模态控制。

第3章 存在的问题及可能的解决思路

3.1 存在的问题

(1) 机器人在跳跃姿态下电机的数据力矩一直处于饱和状态导致机器人跳跃姿态不理想。

(2) 机器人在连续上台阶时存在姿态不稳定情况，目前只可以登上单级台阶。

3.2 可能得解决思路

1.对于机器人跳跃姿态不理想问题，可以通过对跳跃过程进行动力学分析，求解跳跃过程中需要电机的实际转速扭矩对应关系，判断是否为电机性能饱和导致的跳跃姿势不理想，同时也可以优化跳跃过程中的设定参数曲线，优化跳跃效果。

2.对于机器人连续上台阶不稳定情况，可以通过调整机器人机体的重心高度和调整机器人上台阶时的步态进行优化。

第 4 章 后期拟完成的研究工作及进度安排

4.1 后期拟完成的工作

- (1) 继续优化机器人跳跃功能。
- (2) 改良机器人打滑检测算法和打滑恢复算法，优化上台阶效果。
- (3) 对机器人多模态运动实验进行设计和采集。
- (4) 撰写毕业论文并准备答辩材料。

4.2 后期进度安排

- (1) 2024.11-2025.1 继续优化完成机器人控制算法。
- (2) 2025.2-2025.3 设计实验，采集整理实验数据。
- (3) 2025.4-2025.6 撰写毕业论文并准备答辩材料。

第 5 章 实际研究工作存在与开题报告内容 不相符的部分

暂无。

第 6 章 培养方案中规定的学术研究成果完成情况

1. 陆志国，李松昊，陈浩轩，陈培泽. 一种轮圈腿式多模态平衡移动机器人及工作方法: ZL202311348645.X [P]. 2023-12-01.

第 7 章 按期完成学位论文的可能性

目前本课题已完成 70%，完成了轮圈腿式平衡机器人的原理分析，仿真搭建以及实物平台搭建，进行了控制器仿真与实物验证。下一步工作重点在机器人结构和控制算法的优化和学位论文的撰写。一切按进度安排正常进行，可以在规定日期前正常完成学位论文。

参考文献

1. 王月钦. 一种轮腿式越障机器人的设计与实验研究[D], 北方工业大学, 2023.
2. 张建. 双轮自平衡移动机器人的设计与研究[D], 安徽大学, 2016.
3. 游攻博, 陆春月, 成国振, 等. 一种开闭链混合的多模式移动轮腿机器人设计与仿真研究[J], 机械设计与制造工程, 2024, 53(3):59-63.
4. 徐龙, 新型轮腿可变式移动机器人设计与分析[D], 大连交通大学, 2023.
5. Klokowski P, Eßer J, Gramse N, et al. evoBOT—Design and Learning-Based Control of a Two-Wheeled Compound Inverted Pendulum Robot[C], 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2023, 10425-10432.
6. Sun J, You Y, Zhao X, et al. Towards more possibilities: Motion planning and control for hybrid locomotion of wheeled-legged robots[J], IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 3723-3730.
7. Hutter M, Gehring C, Jud D, et al. Anymal—a highly mobile and dynamic quadrupedal robot[C], 2016 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS), 2016, 38-44.
8. Bjelonic M, Grandia R, Harley O, et al. Whole-body mpc and online gait sequence generation for wheeled-legged robots[C], 2021 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS), 2021, 8388-8395.
9. Vollenweider E, Bjelonic M, Klemm V, et al. Advanced skills through multiple adversarial motion priors in reinforcement learning[C], 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2023, 5120-5126.
10. Bloesch M, Hutter M, Hoepflinger M A, et al. State estimation for legged robots: Consistent fusion of leg kinematics and IMU[J], Robotics: Science and Systems VIII, 2013, 17-25.
11. Klemm V, de Viragh Y, Rohr D, et al. Non-Smooth Trajectory Optimization for Wheeled Balancing Robots with Contact Switches and Impacts[J], IEEE Transactions on Robotics, 2023, 1-20.
12. Klemm V, Morra A, Gulich L, et al. LQR-assisted whole-body control of a wheeled bipedal robot with kinematic loops[J], IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 3745-3752.
13. Li J, Gao X, Huang Q, et al. Controller design of a two-wheeled inverted pendulum mobile robot[C], 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2008, 7-12.
14. Prasad L B, Tyagi B, Gupta H O. Optimal control of nonlinear inverted pendulum system using PID controller and LQR: performance analysis without and with disturbance input[J], International Journal of Automation and Computing, 2014, 11: 661-670.
15. Takaki T, Aoyama T, Ishii I. Development of inverted pendulum robot capable of climbing stairs using planetary wheel mechanism[C], 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013, 5618-5624.

16. Zhang J, Wang S, Wang H, et al. An adaptive approach to whole-body balance control of wheel-bipedal robot Ollie[C], 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2022, 12835-12842.
17. Wang S, Cui L, Zhang J, et al. Balance control of a novel wheel-legged robot: Design and experiments[C], 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2021, 6782-6788.
18. Peng K, Ruan X, Zuo G. Dynamic model and balancing control for two-wheeled self-balancing mobile robot on the slopes[C], Proceedings of the 10th world congress on intelligent control and automation, 2012, 3681-3685.
19. Wardana A A, Takaki T, Aoyama T, et al. Development of a control system for a stair-climbing inverted pendulum robot[C], 2016 International Conference on Instrumentation, Control and Automation (ICA), 2016, 1-5.
20. Klemm V, Morra A, Salzmann C, et al. Ascento: A two-wheeled jumping robot[C], 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2019, 7515-7521.
21. Yu J, Zhu Z, Lu J, et al. Modeling and MPC-Based Pose Tracking for Wheeled Bipedal Robot[J], IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 7881 – 7888.
22. 阮晓钢, 任红格. 两轮自平衡机器人动力学建模及其平衡控制[J], 计算机应用研究, 2009, 26(01):99-101.
23. 茅力非, 两轮自平衡移动机器人建模与控制研究[D], 华中科技大学, 2013.
24. 陈阳, 王洪玺, 张兰勇. 轮腿式平衡机器人控制[J], 信息与控制, 2023, 52 (05): 648-659.
25. Armour R, Paskins K, Bowyer A, et al. Jumping robots: a biomimetic solution to locomotion across rough terrain[J], Bioinspiration & biomimetics, 2007, 2(3): S65.
26. Song G, Yin K, Zhou Y, et al. A surveillance robot with hopping capabilities for home security[J], IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(4): 2034-2039.
27. Jeong S, Takahashi T. Wheeled inverted pendulum type assistant robot: design concept and mobile control[J], Intelligent Service Robotics, 2008, 1(4): 313-320.
28. Sentis L, Khatib O. A whole-body control framework for humanoids operating in human environments[C], Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006, 2641-2648.

<p>课程学习完成情况</p>	<p>(本栏由研究生填写)</p> <p>已修课程学分: 学位课学分:</p> <p>待修课程学分: 课程不及格情况:</p> <p>是否完成培养方案中课程要求:</p> <p>需要说明的情况:</p>
<p>研究生签字栏</p>	<p>本人声明所呈交的《硕士学位论文中期检查报告》是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果, 内容填写真实准确。</p> <p style="text-align: right;">签名: 日期: 年 月 日</p>
<p>导师评语</p>	<p>(需说明本报告是否真实准确, 实际论文工作与计划对比情况, 并对研究进展、阶段性成果、下一步工作计划以及存在的问题进行客观评价)</p> <p style="text-align: right;">签名: 日期: 年 月 日</p>

考 核 小 组 成 员	姓 名	职 称	工 作 单 位	本人签名
考 核 小 组 评 价	<p>（是否按开题报告预定的内容及进度安排进行；已完成的研究内容及成果；论文按时完成的可能性；是否符合东北大学硕士学位论文的基本要求等进行评价）</p> <p>论文工作进展：<input type="checkbox"/>提前完成 <input type="checkbox"/>按计划进行<input type="checkbox"/>基本按计划进行 <input type="checkbox"/>拖延 <input type="checkbox"/>无实质进展</p> <p>综合评价意见：<input type="checkbox"/>优 秀 <input type="checkbox"/>合 格 <input type="checkbox"/>不合格</p> <p>综合评价成绩（百分制）：</p> <p>考核小组评语：</p>			
	<p>考核小组组长签字： 日期： 年 月 日</p>			
学 院 抽 查 结 果				