# 毕业论文

平衡步兵所属的两轮自平衡机器人是非常复杂的智能的控制系统，在控制过程中，通过IMU检测它的姿态信息，经过处理器处理之后会对机器人的电机施加控制，使机器人能够达到平稳状态。它的整体构造是由软件部分和硬件部分两方面组成的。软件部分就是要研究的控制系统和控制算法的设计等等。硬件部分主要是控制系统中所需要的硬件，如控制单元、驱动单元、传感器单元、电源和一些外围的电路等等。还有一部分是机械结构的系统，如用来支持控制系统的车体、车轮、支架、外壳等等。

本质上这是一种基于两轮式倒立摆控制原理的自平衡控制系统，原理上是模拟人的平衡技能。可以做前进、后退、前倾、后倾等各种运动。从侧面观察可以看到机器人平衡状态和倾斜状态。

图示

描述已自动生成

平衡步兵机器人由车体和车轮两部分组成，机器人可以沿电机轴心转动。姿态传感器检测机器人姿态判断其是否处于倾斜状态，控制器计算出控制量并将控制量输出给驱动器，驱动电机转动使机器人保持平衡姿态。两轮机器人运动主要考虑两个问题：姿态平衡控制以及运动与转向控制。

两轮机器人通过控制左右两个电机来实现自平衡控制，当机器人后仰时，此时电机向后转动使两轮自平衡机器人重新恢复平衡状态。同样的道理，当机器人向前倾斜，此时电机正向转动使两轮自平衡机器人恢复平衡。机器人的姿态通过姿态传感器检测出来，控制控制电机的正反转，实现两轮机器人的自平衡。

对于平衡步兵这样一个系统，原理与倒立摆相似，它是一个不稳定的系统，而且它也是非线性的系统。

根据它的数学模型可以看出，在实际应用中，我们首先会想到应用 PID 控制算法到机器人上，因为 PID 控制算法原理简单，操作方便，比较容易实现，所以采用 PID 算法的较多。再有就是极点配置反馈控制，基于线性化模型，得到状态空间方程，这种控制较稳定。由此，每一个算法都会有优点，同时也会存在一定的不足。在目前来说，在对两轮自平衡机器人进行控制时，这两种方法比较常见。当然近些年来自适应控制和模糊控制算法也出现在机器人的应用中，他们具有较好的控制性和鲁棒性。

平衡步兵底盘为多变量、强耦合的不稳定系统。其控制方法主要分为自平衡控制和转向控制两部分，怎样保证在不同的状况下机器人能够自动保持平衡是控制的关键问题，且为了适应比赛时打滑处理，飞坡等情况，对控制算法要求较高，传统 PID 算法应用存在较多局限性。

最优控制作为现代控制理论的发展成果，对此系统较为适用。相较于 MPC 等控制最优算法， LQR 只需离线求解 Ricatti 方程，无需在线求解优化，计算量较小，适合嵌入式 MCU 运行，通过求得的K矩阵在代码里使用数组计算即可完成 LQR 算法的嵌入式端实现。平衡步兵云台仍采用串级 PID 控制。云台及底盘姿态解算使用C 板开源程序中的 AHRS 库函数加上校准零漂，效果良好，满足控制精度要求。

**参考文献以及资料汇总**

**文献博客**

[1]李志超. 两轮自平衡机器人LQR-模糊控制算法研究[D].哈尔滨理工大学,2014.

[2]张慧慧,侯伯杰,高建设等.基于LQR对直线倒立摆的稳摆控制研究及实现[J/OL].机械设计与制造:1-

6[2023-09-21].DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.20230718.007.

[3]魏芬,王素青,邓海琴等.基于模糊控制算法的一级倒立摆控制研究[J].计算机仿真,2023,40(03):320-325.

[4]李修宇,李金凤.两轮自平衡机器人重心偏移自适应控制研究[J].齐齐哈尔大学学报(自然科学

版),2023,39(04):1-5+10.

[5]解宝彬. 两轮自平衡机器人控制算法的研究[D].哈尔滨理工大学,2014.

[6]乔林. 两轮自平衡机器人控制策略研究[D].哈尔滨工程大学,2019.

一阶倒立摆的PID控制和LQR控制 - 廖洽源的文章 - 知乎 https://zhuanlan.zhihu.com/p/54071212

【RM 2023 技术答辩分享会——南京航空航天大学RoboMaster长空御风战队】 https://www.bilibili.co

m/video/BV1dg411z7bR/?share\_source=copy\_web&vd\_source=876c5a71e38d5d87451539bdf1bdd9d

6

**控制理论**

推荐DR\_CAN的视频，以下是哔哩哔哩网页

工程数学：https://space.bilibili.com/230105574/channel/seriesdetail?sid=1569595

动态系统的建模与分析：https://space.bilibili.com/230105574/channel/seriesdetail?sid=1569598

自动控制理论：https://space.bilibili.com/230105574/channel/seriesdetail?sid=3357900

现代控制理论：https://space.bilibili.com/230105574/channel/seriesdetail?sid=1569601

**Simscape**

【matlab的simscape对PID控制下的倒立摆模型建模】 https://www.bilibili.com/video/BV1BL4y1J79

y/?share\_source=copy\_web&vd\_source=876c5a71e38d5d87451539bdf1bdd9d6

【倒立摆控制仿真】 https://www.bilibili.com/video/BV1ro4y1K73a/?share\_source=copy\_web&vd\_s

ource=876c5a71e38d5d87451539bdf1bdd9d6

【小车倒立摆最优控制教程 - Part2 动态推导，LQR控制器设计以及在Simulink Simscape仿真验证】 ht

tps://www.bilibili.com/video/BV1AF411R7T6/?share\_source=copy\_web&vd\_source=876c5a71e38d5d8

7451539bdf1bdd9d6

【LQR倒立摆 从建模到控制 零基础都能复现】 https://www.bilibili.com/video/BV1yU4y1J7dT/?share

\_source=copy\_web&vd\_source=876c5a71e38d5d87451539bdf1bdd9d6

【小车倒立摆的仿真】 https://www.bilibili.com/video/BV1uP4y1T7xi/?share\_source=copy\_web&vd

\_source=876c5a71e38d5d87451539bdf1bdd9d6

**Webots**

https://cyberbotics.com/doc/reference/menu?tab-language=c++

https://cyberbotics.com/doc/guide/robots?version=R2021a

【Webots Full Courses for beginners -超详细入门教程（2020）】 https://www.bilibili.com/video/B

V11V411f7ko/?p=5&share\_source=copy\_web&vd\_source=876c5a71e38d5d87451539bdf1bdd9d6

【实例 手把手搭建Webots四足机器人（机器狗）】 https://www.bilibili.com/video/BV1u44y1f7oU/?s

hare\_source=copy\_web&vd\_source=876c5a71e38d5d87451539bdf1bdd9d6

【【Webots入门教程-1用户界面(UI)】Webots用户界面介绍和基本使用】 https://www.bilibili.com/vi

deo/BV1fF411F7D9/?share\_source=copy\_web&vd\_source=876c5a71e38d5d87451539bdf1bdd9d6

CSDN教程：https://blog.csdn.net/crp997576280/category\_9855084.html

Webots控制器函数详解 - 追梦小公子的文章 - 知乎<https://zhuanlan.zhihu.com/p/406419561>

**ADRC（了解即可）**

【ADRC】跟踪微分器 - 龙猫的文章 - 知乎 https://zhuanlan.zhihu.com/p/511275301

【ADRC】扩张状态观测器(ESO) - 龙猫的文章 - 知乎 https://zhuanlan.zhihu.com/p/513560110

【ADRC】根据ADRC的思想改进PID - 龙猫的文章 - 知乎 https://zhuanlan.zhihu.com/p/514691923

自抗扰控制：https://zhuanlan.zhihu.com/p/515622797

CSDN：http://t.csdn.cn/f1Gft

【ADRC基本概念】 https://www.bilibili.com/video/BV1hY411c7Lq/?share\_source=copy\_web&vd\_s

ource=876c5a71e38d5d87451539bdf1bdd9d6

【ADRC ESO】 https://www.bilibili.com/video/BV1TY4y1r7MY/?share\_source=copy\_web&vd\_sourc

e=876c5a71e38d5d87451539bdf1bdd9dPIF6

**经典倒立摆数学模型**

倒立摆系统是一种多变量、非线性、不稳定的耦合欠驱动机械系统，被广泛地应用于控制理论的教学、实验和验证控制算法的有效性。倒立摆的稳摆控制方法在军工、航天、机器人领域和工业工程上具有很广泛的用途，如人型机器人行走过程中的平衡控制、火箭发射中的垂直度控制和卫星的姿态控制等这些类似于倒立摆的重心在上，支点在下的倒置控制问题。

图示, 工程绘图

描述已自动生成

图3.1（a）为倒立摆系统简化模型图，图3.1（b）为倒立摆系统受力分析图。

在图 1 中，

|  |  |
| --- | --- |
| F | 施加在小车上的驱动力 |
| x | 小车的位移 |
| M | 小车的质量 |
| m | 摆杆质量 |
| b | 小车移动的摩擦系数 |
| I | 摆杆绕其质心的转动惯量（I = 1/(3ml^2) |
| η | 摆杆转动阻力矩系数 |
| θ | 摆杆与竖直向下方向的夹角 |
| Φ | 摆杆与竖直向上方向的夹角（逆时针为正） |