 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i7.11394

Design of Self-Balancing Car Control

Qiang Li[1] Qiang Hao[1] Feifei Huang[1] Wenlin He[2]

1. Guangzhou Railway Technical College, Guangzhou, Guangdong, 511300, China
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lingnan Normal University, Zhanjiang, Guangdong, 524048, China

Abstract

Two-wheeled self-balancing cars are characterized by their compact size and high maneuverability, offering broad application prospects in fields such as robotic transportation, personal mobility devices, and aerospace attitude control. This paper presents the design of a two-wheeled self-balancing car system based on an STM32 microcontroller. The system integrates an MPU6050 inertial measurement unit, DC geared motors, and a Bluetooth communication module to establish a comprehensive control platform comprising hardware drivers and software algorithms. Addressing the inherent underactuated, nonlinear, and strongly coupled dynamics of the system, a cascade PID closed-loop control strategy is employed, utilizing a complementary filtering algorithm to fuse sensor data for precise pitch angle estimation. Implementation results demonstrate that the optimized PID controller endows the car with robust dynamic stability on flat surfaces, enabling rapid and accurate responses to commands for forward motion, backward motion, and steering, thereby verifying the effectiveness of the proposed scheme.

Keywords

PID closed-loop control; microcontroller; self-balancing car

自平衡车控制系统设计

李强[1] 郝强[1] 黄菲菲[1] 何文林[2]

1. 广州铁路职业技术学院，中国 · 广东 广州 511300
2. 岭南师范学院机电工程学院，中国 · 广东 湛江 524048

摘　要

两轮自平衡小车具有体积小巧、运动灵活等特点，在机器人平衡车、个人交通工具、航空航天姿态控制等领域具有广泛的应用前景。本文设计了一款基于STM32的两轮自平衡小车系统。该系统以STM32F1为主控芯片，集成MPU6050姿态传感器、直流减速电机及蓝牙通信模块，构建了包含硬件驱动与软件算法的控制平台。针对系统存在的欠驱动、非线性及强耦合特性，研究采用串级PID闭环控制策略，利用互补滤波融合传感器数据以获取精确俯仰角。实现结果表明，优化后的PID控制器使小车在平稳路面具备良好的动态稳定性，能快速、准确地响应前进、后退及转向指令，验证了该方案的有效性。

关键词

PID闭环控制；单片机；平衡车

1 引言

进入 21 世纪以来，伴随全球范围内对智能短途交通与移动服务机器人的持续探索，两轮自平衡小车已成为国际机器人控制领域的研究热点之一。依托自动控制理论、嵌入式系统与传感器融合技术的快速发展[1]，该类车辆采用两个轮子独立驱动的移动运输设备，具有体积小巧、运动灵活等特点，是一种典型的欠驱动、非线性、强耦合系统。其动力学建模与稳定控制涵盖了经典与现代控制理论的诸多难点，是验证先进算法的理想实验载体，是控制理论、机器人技术和嵌入式系统应用的理想实验平台[2-3]。其核心在于解决“倒立摆”这一本质不稳定系统的实时平衡问题，相关研究成果已广泛应用于服务机器人、智能代步工具及飞行器姿态控制等高精尖领域[4-5]。

目前，关于两轮自平衡小车的研究主要集中在系统结构设计、姿态检测与运动控制策略等方面[4, 6]。鉴于其典型的非线性、强耦合特性，研究者致力于采用 PID、模糊逻辑及自抗扰等多种平衡算法以实现系统动态稳定，并通过仿真与实物调试对各解决方案的有效性进行检验。此类研究不仅验证了现代控制理论的工程适用性，更为智能短途交通及服务型机器人的研发提供了重要的理论与应用价值。本文以两轮自平衡小车如何实现平衡为研究内容，考虑了两轮自平衡小车的动态稳定性以及远程交互能力，提出了一种基于串级

【基金项目】2026 年广东省科技创新战略专项资金（大学生科技创新培育）（项目编号：2026KJCX005）。

【作者简介】李强（1989–），男，中国江苏徐州人，博士，讲师，从事计算摩擦学研究。

PID 闭环控制算法的小车自平衡系统。

2 系统设计方案

2.1 硬件系统

本系统以功能实现为导向，构建了基于 STM32F1 列的硬件控制平台。选用 STM32F103C8T6 作为主控芯片[7]，该芯片为 ST 公司出品的 ARM 架构 32 位 MCU，使用 Cortex-M3 核心具有 72MHz 主频可以完成高速的姿态解算和电机 PWM 的输出，确保系统的响应速度远远高于小车倾倒的时间常数，拥有具有八组 GPIO 接口，扩展性非常好，通过 GPIO 接口可实现复杂时序以及多种协议和驱动的构建，能够高效处理传感器数据并输出精准的控制信号。在 PID 误差计算中，相对于传统的 8 位单片机，计算效率提高了 10 倍以上，保证了算法的实时性。此外在编码器接口方面， STM32C8T6 具有高级定时器 1（TIM1），通用定时器 3 个（TIM2、TIM3、TIM4），可用 TIM3、TIM4 直接捕获霍尔编码器的正交信号，实现电机转速的测量，无需外挂芯片。最后 STM32C8T6 具有大容量储存空间、可容纳复杂控制程序和多线程任务以及数据缓冲，避免造成因内存不足导致地代码裁剪或功能不足。

MPU605[4] 是一款非常经典的六轴惯性测量单元（IMU），它将三轴加速度计和三轴陀螺仪集成在一颗芯片中，被广泛应用于无人机、机器人、智能手机等需要运动检测和姿态控制的设备中。主要通过 I2C 协议与主控芯片通信，连接简单；同时提供 16 位 ADC 采样、1 kHz 数据输出率及 ±0.01° 分辨率，配合互补滤波算法可实现对倾角实时检测。MPU6050 凭借其价格便宜，集成度高，通信简单等优势，成为了平衡车等嵌入式控制系统在有限预算前提下实现高精度控制的最优解。

通过 MPU605 采集小车姿态，利用电机驱动芯片控制两路直流减速电机，供电部分采用两节锂电池经过降压芯片给系统供电；然后为了实现手机 APP 遥控小车的功能，本文使用蓝牙模块与手机通信，进而实现手机控制小车的功能[8]；最后为了小车后续的调试方便，本文在硬件系统中集成 OLED 显示屏和按键进行调试。小车实物结构如图 1 所示。

2.2 软件系统

软件基于 keil5 编写代码，利用软件模拟 I2C 与 MUP6050、OLED 通信，采用 5ms 定时中断读取传感器并计算俯仰角，通过串级 PID 控制计算出 PWM，输出至直流减速电机同时设计非阻塞的按键功能[9]。综上，基于 STM32 单片机的平衡车设计框图如图 2 所示。

2.3 小车平衡的实现

目前实现两轮平衡车的算法主要是 PID 和 LQP 控制算法，由于 PID 对被控对象模型要求低，无需建模，即使被控对象内部运作规律不明确，PID 也能进行调控，因此本文基于 PID 控制算法[10]，利用互补滤波算法计算出小车俯仰角，进而实现小车平衡和转弯。

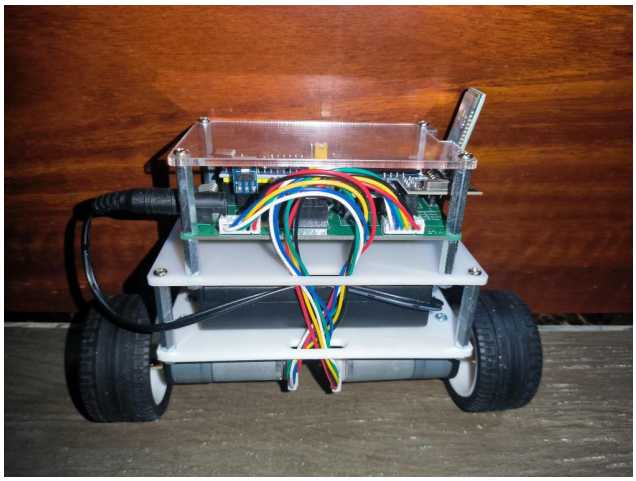


图 1 平衡车实物

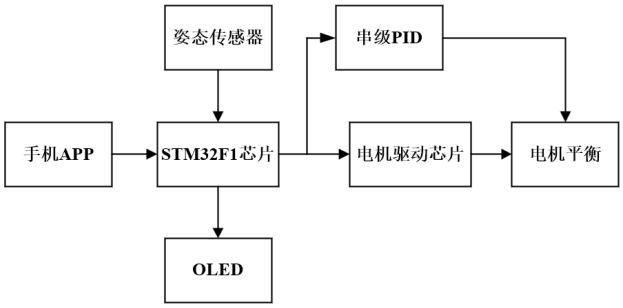


图 2 平衡车设计框图

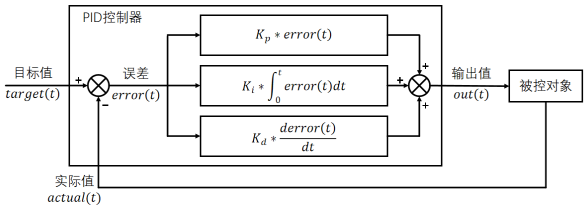


图 3 PID 控制的方框图

3 平衡车测试

3.1 PID 参数以及优化

本文使用 STM32 标准库基于上文的分析完成硬件基础功能，利用互补滤波获得小车的俯仰角，构建 PID 闭环控制，以实现小车的前进、后退以及转向。由于电机启动需要一定力度，以及当目标值大幅度跳变时，误差也会大幅度跳变，这回导致微分向突然输出一个很大的调控力度，如果系统的目标值频繁变换，此时系统可能会造成失调，此外，当系统受到卡顿、断电等问题造成系统无法跟踪目标值，从而会使得误差积分无限加大，可能存在安全隐患。基于上述问题，

本文对 PID 进行了优化，首先，给角度环加一个输出偏移，以此来解决电机启动需要一定力度问题；然后，将对误差的微分改成对实际值的微分，以此来解决系统的目标值频繁变换造成失调问题；最后通过给误差积分加一个上下界防止积分无限加大。角度环的输出偏移计算公式见式（3-1）。

$$out=\begin{cases}0, & out=0\\ out+offset, & out>0\\ out-offset, & out<0\end{cases} \quad \text{式（3-1）}$$

3.2 平衡车性能测试

使用 Keil5 软件进行相关代码的编写后，将代码下载到小车中，在测试过程中小车具有良好的稳定性，以及能快速、准确地跟踪目标。小车跟踪目标值可视化结果如图 4 所示，红色线表示目标值，绿色线表示实际值。由图可知，当小车进行左右转弯时，实际值能够快速、准确地跟踪目标值，虽然存在少量抖动，但是在合理范围内。

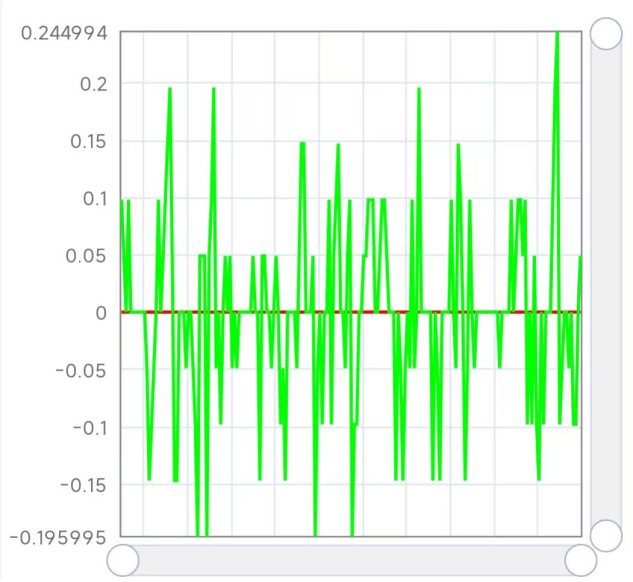


图 4 跟踪目标值可视化图

4 结论

为了实现两轮小车的平衡，本文使用编码器获取小车当前电机的实际速度，以此构建串级 PID 闭环控制，并对 PID 控制器进行了优化。该 PID 控制器的各环参数设计能够很好的满足小车跟踪目标时的稳定性、快速性以及准确性。由于时间和成本有限，本文的硬件选型以及电路设计并不是最优解，以及小车只在平稳的路面进行测试，并不能保证复杂情况的稳定性。

参考文献

[1] SHEN Xiaowei, YAO Minli, JIA Weiming, et al. Adaptive complementary filter using fuzzy logic and simultaneous perturbation stochastic approximation algorithm [J]. Measurement, 2012, 45(5): 1257-126.

[2] 方晓毅, 丁浩, 王睿麟, 等. 基于STM32的模块化平衡车设计 [J]. 电子测试, 2017, (13): 24-25.

[3] 俞晨吉, 潘泽庆, 胡海洋, 等. 基于STM32的两轮自平衡车控制系统设计 [J]. 信息技术与信息化, 2023, (08): 12-15.

[4] 李娇, 向洲, 陈华, 等. 基于MPU6050六轴陀螺仪的高精度动态水平姿态监测系统的开发与应用 [J]. 河南科技, 2025, 52(05): 38-43.

[5] 张强志, 黄杰贤, 张铭, 等. 基于STM32与PID控制的智能平衡车 [J].物联网技术, 2025, 15(24): 78-82.

[6] 陈元威. 基于嵌入式的自平衡车理论研究和模型建立 [J]. 仪表技术, 2023, (03): 75-76+80.

[7] 蔡杏山. 单片机三剑客 [M]. 机械工业出版社, 202406:314.

[8] 王晶. 基于PID的蓝牙平衡车系统的设计 [J]. 计算机与数字工程, 2020, 48(06): 1334-1338.

[9] 张承岫, 李铁鹰, 王耀力. 基于MPU6050和互补滤波的四旋翼飞控系统设计[J]. 传感技术学报, 2016, 29(07): 1011-1015.

[10] 聂茹. 基于STM32F103C8T6的两轮自平衡车系统设计 [J]. 微型电脑应用, 2021, 37(01): 10-12+22.