

文章编号: 2096-1618(2022)02-0138-06

# 基于单片机的智能平衡小车设计

张灵玉, 邓 博, 袁 林, 贺 壮, 杨 波

(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**为满足出行需求,提高平衡小车的智能化水平,采用 D 型车模平台,RT1021 单片机为核心控制单元,MPU6050 姿态传感器采集小车姿态信息,运用卡尔曼滤波算法对陀螺仪采集数据进行融合与分析得到系统当前状态的最优化输出,最后通过串级 PID 控制电机输出,设计一款基于单片机的自主直立、自动循迹、主动避障的智能平衡小车。系统设计主要包括人机交互模块、传感器模块、电机驱动模块、运算放大模块,由软硬件两部分内容共同构建具有信号输入和控制反馈的闭环系统。经过多次测试表明:在室内 PVC 赛道上,平衡小车能够在平均 2.5 m/s 的速度下,实现自主直立、寻迹、避障,且具有较强的抗干扰能力,符合设计要求。

**关 键 词:**平衡小车;RT1021 单片机;MPU6050;串级 PID;卡尔曼滤波

**中图分类号:**TP273

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2022.02.004

## 0 引言

平衡车的研究最早开始于日本和欧美地区,如今在国外,由于平衡车体积小、易操作、方便灵活等特点,引起了很多专家学者与研发机构的关注,已经发展成为较成熟的产业,在各个领域皆有应用。国外主要有由瑞士联邦工业大学研发的两轮遥控机器人 JOE 及由美国南卫理公会大学设计的 nBot 两轮移动车,这两种移动车都不具备自主直立的功能。而中国对于平衡车研究起步较晚,但随着科学技术的进步,各研究院及高校诞生了许多基于不同设计方案、不同目的、不同控制方式的自平衡系统。主要有 Sway 两轮移动车、Free Mover 双轮移动车等,其缺点主要是算法复杂且价格昂贵。

目前两轮自平衡车的姿态信息获取,一般采用陀螺仪、加速度计进行数据采集,通过算法将姿态信息融合的方式,得到准确的姿态信息。两轮自平衡车非常不稳定且控制任务复杂,当前的两轮自平衡车在实现自主直立行驶、特殊元素识别等功能方面还有待提高。为弥补当前两轮自平衡小车的不足,本设计以 D 型车模型为基础架构,首先采用电机驱动及 Mini 编码器实现闭环控制,实现小车的姿态检测与平衡控制,采用陀螺仪、红外传感器等对特殊元素进行识别,再使用卡尔曼滤波法对陀螺仪采集数据进行姿态融合进行直立环控制,极大提高系统直立控制稳定。同时采用串级 PID 算法对直立环与速度环串行控制,转向环控制及电机控制,提高智能平衡小车运行过程中的稳定性及抗干扰能力,保证小

车运行稳定可靠。

## 1 系统总体设计

以 D 型车模作为小车基本架构,选用 RT1021 作为核心控制器,对电磁信号、编码器信号、陀螺仪采集数据、传感器信号等数据进行分析,通过控制算法执行对应操作命令,系统软件开发工具选用 IAR 进行软件编程。小车的路径感应采用工字电感,信号经谐振选频、运算放大、倍压检波后反馈给单片机,单片机计算小车当前位置偏移;小车的姿态信息采集采用陀螺仪 MPU6050<sup>[1-10]</sup>,经过卡尔曼滤波<sup>[11-13]</sup>后输出当前小车实时姿态;小车的测速装置采用 Mini 编码器,可检测速度大小与方向;小车的特殊元素识别采用红外传感器、激光雷达传感器、电感、陀螺仪。

该系统以检测电磁信号为基础,通过单片机处理各传感器产生信号,实现对小车的控制,实现小车在设定道路上平稳且准确的寻迹行驶。本次系统设计主要由单片机最小系统模块、运算放大模块、电机驱动模块、电源模块、传感器模块、人机交互模块组成,通过各部分协调合作为小车提供硬件基础,系统设计框图如图 1 所示。

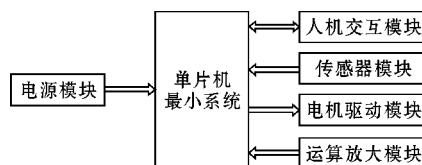


图 1 系统设计框图

系统各个模块功能如表 1 所示。

表 1 系统模块功能表

序号	模块	功能
1	单片机	RT1021, 整个系统核心控制器
2	电源	AMS1117、MC34063, 为各个功能模块提供稳定电源电压
3	传感器	MPU6050、红外传感器、Mini 编码器, 系统环境信息检测
4	电机驱动	HIP4082、控制电机输出
5	运算放大	OPA4350, 电感信号放大
6	人机交互	OLED、无线模块、拨码开关, 便于系统调试

2 主要硬件设计

2.1 电机驱动电路

采用集成芯片 HIP4082 对电机驱动电路进行设计,如图 2 所示,该芯片具有欠压保护和击穿保护等特点。通过单片机的 PWM 接口输出对应频率、占空比的 PWM 信号,信号通过集成芯片 HIP4082 控制 MOS 管的导通与截止,实现电机控制。

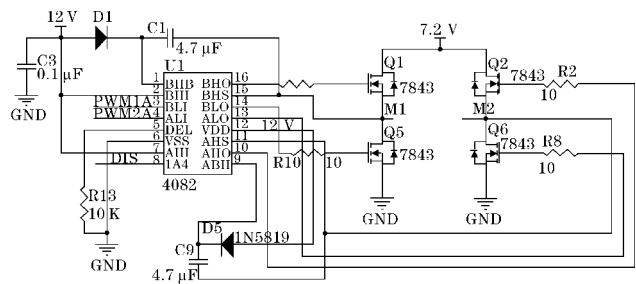


图 2 电机驱动电路

单片机与电机驱动电路之间可能会因电的连接对电机控制产生干扰,为防止这一干扰,在这两个电路之间增设光耦隔离电路,如图 3 所示,避免了输出信号对输入信号的影响,提高了电路的抗干扰能力,同时使光耦隔离电路具有电平转换作用,可以使输入信号转换为单片机可识别的 TTL 电平信号。

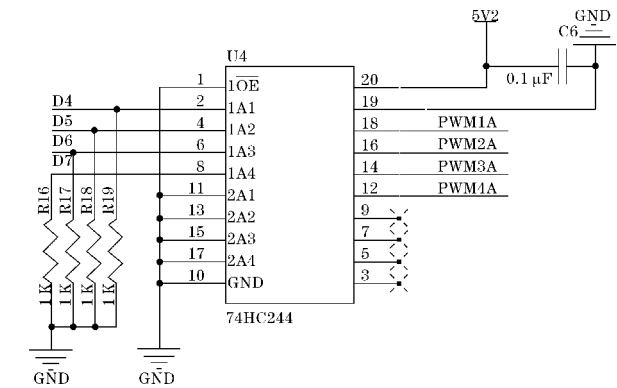


图 3 光耦隔离电路

2.2 陀螺仪 MPU6050

MPU6050 由三轴加速度计与三轴陀螺仪组成,主要用于测量小车角速度与角加速度,该传感器采用 3.3 V 供电,通信方式为软件 IIC 通信协议,芯片内置有 16 位的 AD 转换器。MPU6050 接口电路如图 4 所示。

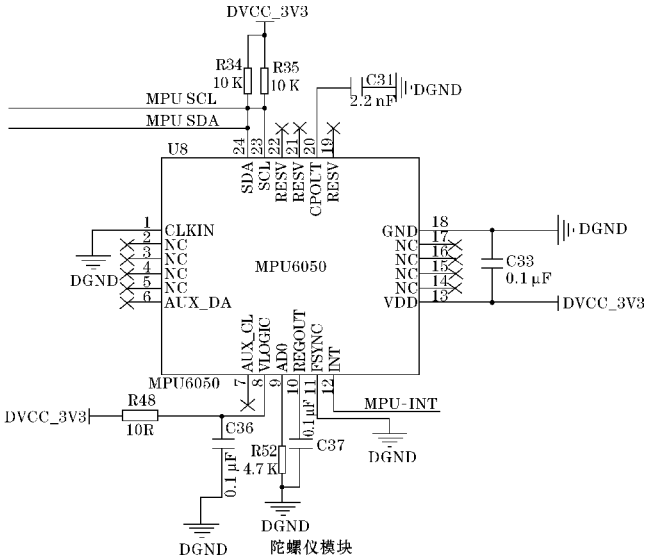
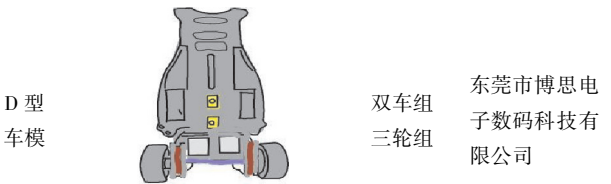


图 4 MPU6050 接口电路

2.3 智能平衡小车机械结构设计

2.3.1 车体结构

设计选用 D 型车模,如图 5 所示。



电机 RS-380

图 5 D 车模信息

2.3.2 电路板安装

小车的机械平衡点对于小车平衡控制至关重要,在组装小车时尽量使重心保持在轮胎中心,因此将电路板安装在车轮正上方位置,从而实现重心保持在轮胎中心,提高小车运行过程中的稳定性。小车电路板安装如图 6 所示。

2.3.3 电池固定

采用 NI-Cd 充电电池,其重量较重,在整车中占很大的比例,影响重心,所以电池固定的位置至关重要。因此将电池安装在车模轮胎后面并使用扎带进行固定(见图 7)使重心后移。重心后移使小车具有机械平衡点,从而使转向更加灵敏,车模运行更加稳定和流畅,也可减少车模外部配重的使用。

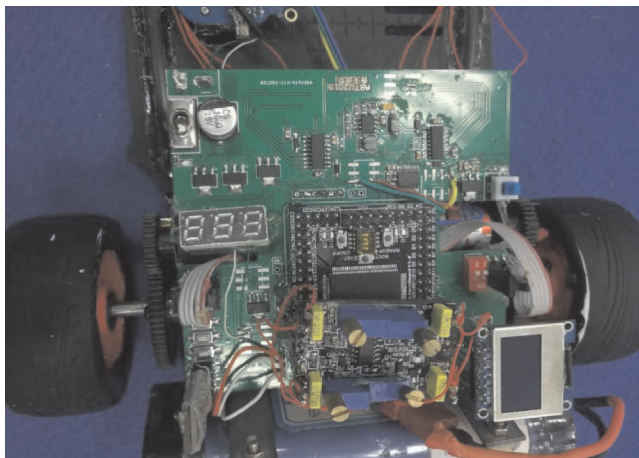


图6 电路板安装示意图

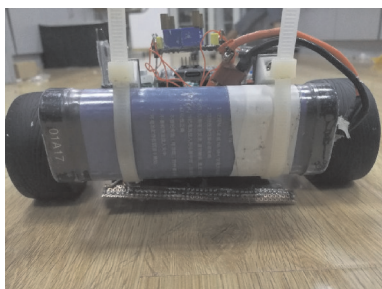


图7 小车电池安装示意图

### 3 主要软件设计

#### 3.1 系统软件设计

系统软件设计是智能平衡小车设计的关键,根据系统设计需求,软件需完成直立环控制、速度环控制、转向环控制、姿态采集和特殊元素识别,其中直立环控制采用卡尔曼滤波法对陀螺仪采集数据进行姿态融合,通过串级PID<sup>[14-20]</sup>算法对直立环与速度环串行控制,同时运用串级PID算法进行转向环控制及电机控制,保证小车运行稳定可靠,主程序设计流程图如图8所示。

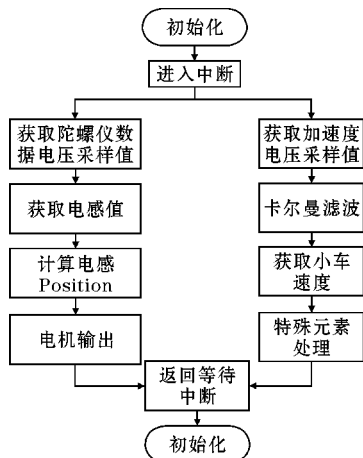


图8 主程序流程图

#### 3.2 算法部分

##### 3.2.1 PID 算法

PID 是一种闭环控制的算法,通过测量机构将被控对象的值反馈到控制对象的机构中,PID 算法从比例控制(P)、积分控制(I)、微分控制(D)3 个方面进行控制。

串级 PID 控制算法是一种使调节时间更短、系统快速性更强、系统工作频率更高的控制算法。串级 PID 控制由 2 个 PID 控制器组成,一般情况下,将外环输出作为内环控制的期望值,再通过内环控制器输出去控制对象,实现串级控制。此算法可极大减小二次干扰,以外环控制作为主导,首先对内环进行调试,当内环输出稳定后,再结合内环输出对外环进行调试,由此可使内环控制器根据外环输出对系统进行实时控制,从而使系统能够更快的响应,极大提高系统稳定性。设计中,采用串级 PID 对小车的直立环和速度环进行串级控制,串级控制原理图如图 9 所示。

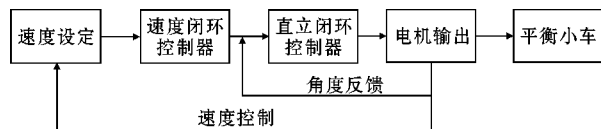


图9 串级控制原理图

由图 9 可知,串级 PID 控制是以速度环作为外环,直立环作为内环,速度环输出作为直立环输入,直立环输出控制电机输出,从而实现小车自主平衡。直立 PID 控制算法与速度控制算法的数学表达式为

$$a = K_p \cdot (\theta_1 - a_1) + K_d \cdot \theta_2 \quad (1)$$

$$a_1 = K_{p1} \cdot e(k) + K_{i1} \cdot \sum e(k) \quad (2)$$

式中: $a$  为直立环输出; $a_1$  为速度环输出; $\theta_1$  为小车姿态融合后输出的角度; $\theta_2$  为小车角速度; $e(k)$  为速度环偏差; $\sum e(k)$  为速度环偏差积分; $K_p$  为直立环比例控制系数; $K_d$  为直立环微分控制系数; $K_{p1}$  为速度环比例控制系数; $K_{i1}$  为速度环积分控制系数。

可以看出,直立环控制采用 PD 控制,由于在编码器测速过程中容易产生噪声,为防止噪声被放大,速度环控制采用 PI 控制。由式(1)、(2)可知,直立控制为负反馈控制器,速度控制为正反馈控制器,2 个控制器串联后,可以得到让小车在给定速度下保持直立运动的算法。将上述 2 式整合后,得到:

$$a = K_p \cdot (\theta_1 - a_1) + K_d \cdot \theta_2 - K_p [K_{p1} \cdot e(k) + K_{i1} \cdot \sum e(k)] \quad (3)$$

##### 3.2.2 卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波是一种适用于线性系统,对系统进行最优估计的算法。卡尔曼滤波在本质上是根据当前传



传感器测量值和上一时刻预测值与误差,计算当前时刻的最优测量值,再计算下一时刻预测值,其中的误差为预测误差与测量误差,即噪声,由此可以看出卡尔曼滤波算法也是一个滤波过程。

卡尔曼滤波算法由状态预测方程、均方误差方程、滤波增益方程、滤波估计方程、滤波均方误差更新矩阵方程组成,方程具体如下。

状态预测方程: $\hat{x}_t=A\hat{x}_{t-1}+Bu_{t-1}$  (4)

均方误差方程: $P_t=AP_{t-1}A^T+Q$  (5)

滤波增益方程: $K_t=\frac{P_tH^T}{HP_tH^T+R}$  (6)

滤波估计方程: $\hat{x}_t=\hat{x}_t+K_t(z_t-H\hat{x}_t)$  (7)

滤波均方误差更新矩阵方程: $P_t=(I-K_tH)$  (8)

式中: $\hat{x},\hat{x}_{t-1}$ 表示 $t$ 时刻与 $t-1$ 时刻的后验状态估计值,即系统状态更新后的结果,也叫最优估计。 $\hat{x}_t$ 表示 $t$ 时刻的先验状态估计值,即根据上一时刻的最优估计预测出此时系统状态的预测值。 $P_t$ 表示 $t$ 时刻的先验估计协方差,即根据上一时刻的估计协方差预测出此时系统状态的协方差。 $P_t,P_{t-1}$ 表示 $t$ 时刻与 $t-1$ 时刻的后验估计协方差,即系统的不确定度。 $H$ 表示将状态和测量连接起来的关系。 $z_t$ 表示传感器测量值。 $K_t$ 表示卡尔曼系数,即卡尔曼增益。 $Q$ 表示过程激励噪声协方差。 $I$ 表示1的矩阵,对于单模型单测量, $I=1$ 。 $R$ 表示测量噪声协方差,可通过观测得到。

式(4)、(5)是对系统状态的预测,即通过上一次状态的结果计算当前状态的最优估计值,式(5)、(7)、(8)是对系统状态进行最优化输出,根据当前传感器测量值及系统状态预测值,计算出当前系统状态的最优化估算值,最后更新系统状态。

4 结果分析

4.1 系统综合调试

在如图 10 所示的 PVC 赛道上,分别对坡道、圆环、障碍进行系统调试与测试,再对系统进行综合调试,调试结果如表 2~5 所示。



图 10 PVC 赛道

表 2 坡道测试结果

序号	赛道长度/m	特殊赛道元素	正向行驶时长/s	反向行驶时长/s	测试次数	成功次数
1	57	坡道	23.2	23.5	5	5
2	57	坡道	22.6	22.8	5	5

表 3 圆环测试结果

序号	赛道长度/m	特殊赛道元素	正向行驶时长/s	反向行驶时长/s	测试次数	成功次数
1	69	圆环	27.25	27.8	6	6
2	69	圆环	27.1	27.5	6	5

表 4 障碍测试结果

序号	赛道长度/m	特殊赛道元素	正向行驶时长/s	反向行驶时长/s	测试次数	成功次数
1	57	障碍、坡道	24.3	24.6	8	6
2	57	障碍、坡道	24.5	24.8	8	7

表 5 综合测试结果

序号	赛道长度/m	特殊赛道元素	正向行驶时长/s	反向行驶时长/s	测试次数	成功次数
1	1	69	障碍、坡道、圆环	28.76	29.02	5
2	2	69	障碍、坡道、圆环	28.54	28.98	5

由以上数据可知,小车能够以平均速度 $2.5\text{ m/s}$ 的速度行驶,且通过坡道的成功率为 $100\%$ ,圆环成功率为 $83.3\%$ ,障碍成功率为 $81.25\%$ ,由此可以看出,本次设计的智能自平衡小车能够以 $2.5\text{ m/s}$ 的速度平稳快速行驶,可自动识别并通过坡道、圆环、障碍,满足设计要求。

## 5 结束语

本次设计主要是对智能平衡小车的控制算法、机械结构、系统硬件与软件设计进行研究和分析,同时完成了对应参数及功能调试,实现了智能平衡小车的自主直立控制与特殊元素识别。系统的硬件设计是以单片机 RT1021 为控制核心,采用集成运放 OPA4350 完成信号的选频、放大、检波,为小车提供精准的位置信息,采用 AMS1117-3.3V、AMS1117-5V 等线性稳压芯片为系统各模块供电,采用陀螺仪 MPU6050 作为姿态检测系统,通过电机驱动电路及 Mini 编码器实现电机闭环控制,实现小车的姿态检测与平衡控制。系统的软件设计主要是以小车姿态融合算法为核心,通过卡尔曼滤波算法对陀螺仪数据进行最优估计,极大提高系统直立控制稳定性,同时采用串级 PID 算法提高智能平衡小车运行过程中的稳定性以及抗干扰能力,为系统的控制提供有力保障。利用红外传感器、电感线圈实现特殊元素识别。实现了智能平衡小车的自主直立行驶、特殊元素识别。小车能够在保持直立的状态下完成前进、转弯、避障、上坡、入圆环等动作,对两轮平衡车的发展具有一定的参考意义。

## 参考文献:

- [1] 韩帅,刘满禄,张俊俊,等.基于两轮自平衡小车的模糊自适应补偿算法研究[J].机械设计与制造,2020(9):197-200.
- [2] 何华光,梁超,殷金伟,等.基于 ARM 与遗传算法的智能小车的设计与实现[J].现代电子技术,2015,38(19):152-155.
- [3] 符新东,张大兴,袁帅.两轮自平衡小车的状态反馈和输出反馈控制[J].仪表技术与传感器,2018(8):90-93.
- [4] 王素青,熊维堂.基于 STM32 的两轮自平衡小车系统设计[J].实验室研究与探索,2016,35(5):146-150.
- [5] 王辉,于立君,董泽全,等.基于 STM32 的循迹平衡小车实验教学平台研究[J].实验技术与管理,2017,34(5):136-139.
- [6] 张小明,王坤坤,于纪言.旋转倒立摆串级 PID 低通滤波控制系统的设计[J].现代电子技术,2020,43(4):21-24.
- [7] 程华,张雪婷,房一泉.基于扩散卡尔曼滤波算法的目标跟踪估计[J].计算机应用与软件,2021,38(2):191-197.
- [8] 赵云娥,吴振强.基于 Arduino 的双模式智能避障小车系统设计与实现[J].现代电子技术,2017,40(21):94-97.
- [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与实现[J].传感技术学报,2016,29(7):1011-1015.
- [10] 傅忠云,朱海霞,孙金秋,等.基于惯性传感器 MPU6050 的滤波算法研究[J].压电与声光,2015,37(5):821-825.
- [11] 程华,张雪婷,房一泉.基于扩散卡尔曼滤波算法的目标跟踪估计[J].计算机应用与软件,2021,38(2):191-197.
- [12] 吴佳慧,冉昌艳.融合自适应卡尔曼和小波的 MEMS 陀螺去噪方法[J].仪表技术与传感器,2021(2):109-112.
- [13] 李春辉,马健,杨永建,等.基于修正的自适应平方根容积卡尔曼滤波算法[J].系统工程与电子技术,2021.
- [14] 高志伟,代学武.自平衡小车 LQR-PID 平衡与路径跟踪控制器设计[J].控制工程,2020,27(4):708-714.
- [15] 周树道,张阳春,王敏.双变量串级 PID 板球控制系统的设计与实现[J].科学技术与工程,2021,21(4):1454-1458.
- [16] 刘洋,行鸿彦,侯天浩.四旋翼无人机串级变论域模糊 PID 姿态控制研究[J].电子测量与仪器学报,2019,33(10):46-52.
- [17] 窦立环.基于自适应模糊 PID 的二级倒立摆稳定控制研究[J].工业仪表与自动化装置,2017(6):124-127.
- [18] 夏国清,陈华珍.模糊理论和 PID 相融合的两轮自平衡机器人智能控制系统[J].现代电子技术,2018,41(21):117-120.
- [19] 盛广润,高国伟,李璇烨,等.四旋翼飞行器串级模糊自适应 PID 优化控制系统研究[J].现代电子技术,2020,43(22):67-71.
- [20] 刘金琨.先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M].北京:电子工业出版社,2016:474-502.

## Design of Intelligent Balance Car based on MCU

ZHANG Lingyu, DENG Bo, YUAN Lin, HE Zhuang, YANG Bo

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** In order to meet the travel needs of people, and improve the intelligent level of balanced cars, this paper uses a D-type car model platform, and the RT1021 single-chip microcomputer as the core control unit, the MPU6050 attitude sensor to collect car posture information, and the Kalman filtering algorithm is used to fuse and analyze the gyroscope data to get the optimal output of the current state of the system. Finally, the motor output is controlled by the cascade PID, and the intelligent balance car based on the single-chip is designed, which can stand upright, track automatically and avoid obstacles actively. The system design mainly includes human-computer interactive modules, sensor modules, motor drive modules and operational amplification modules; a closed-loop system with signal input and control feedback is constructed by two parts of hardware software and hardware. Many tests show that on the indoor PVC track, the balance car can achieve autonomous upright, tracing, obstacle avoidance at the average 2.5 m/s speed, and has strong anti-interference ability, which meets the design requirements.

**Keywords:** balancing car; RT1021 MCU; MPU6050; cascade PID; Kalman filter