

# 基于自抗扰控制器的平衡小车

朱品伟<sup>1</sup> 钱韬宇<sup>1</sup> 陈展鹏<sup>1</sup> 朱二琳<sup>1</sup>

ZHU Pinwei QIAN Taoyu CHEN Zhanpeng ZHU Erlin

## 摘要

为缓和传统PID控制器在系统响应快速性和超调性之间的矛盾,设计了一种基于线性自抗扰控制器的跷跷板平衡小车。采用STM32单片机为控制核心,通过MPU6050传感器采集跷跷板角度,通过串口接收控制器参数,基于自抗扰控制算法输出直流减速电机控制量,实现了小车快速寻找跷跷板平衡点的功能。实践证明,自抗扰控制器无积分控制环节也可以消除静态误差,具有良好的控制品质。

## 关键词

单片机;自抗扰控制;倾角传感器;MPU6050

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.05.047

## 0 引言

目前,PID控制算法简单、鲁棒性好和可靠性高,被广泛应用于工业过程控制。PID控制的比例项能够在误差较大时及时减小误差,积分项可消除静态误差,微分项可抑制超调、减少震荡,使系统快速收敛。在不能建立精确的系统数学模型、系统的结构和参数都存在不确定性时,PID控制器

是一种合适的选择。但由于实际对象通常具有非线性、时变不确定性、强干扰等特性,应用常规PID控制器难以达到理想的控制效果。另外,在生产现场,由于参数整定方法繁杂,常规PID控制器参数往往整定不良、性能欠佳。

在PID控制器的基础上提出的自抗扰控制器采用了基于误差来消除误差的思想,可以缓和系统响应快速性和超调性之间的矛盾,即便没有积分环节也可消除静态误差<sup>[1]</sup>。本文设计了一种采用线性自抗扰控制器(linear active disturbance rejection controller, LADRC)的跷跷板平衡小车,通过倾角传感器MPU6050模块检测跷跷板的倾斜角度,与平衡角度相比较获得角度误差,经过线性自抗扰控制器处理后,输出

1. 江苏理工学院电气信息工程学院 江苏常州 213001

[基金项目] 江苏省自然科学基金“伺服系统抗扰及跟踪性能优化设计”(BK20221404)

[7]WANG L, YANG W, CHEN D, et al. Towards codable text watermarking for large language models[EB/OL]. (2023-07-29)[2024-03-01]. <https://arxiv.org/abs/2307.15992>.

[8]李国华. 基于字符信息量法则的串匹配算法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.

[9]游荣彦. Zipf定律与汉字字频分布[J]. 中文信息学报, 2000(3): 60-65.

[10]How many words are there in English[EB/OL]. [2024-03-18]. <https://www.merriam-webster.com/help/faq-how-many-english-words>.

[11]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 信息技术 中文编码字符集:GB 18030-2022[S]. 北京: 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会, 2022.

[12]韩娜, 漆晨航. 生成式人工智能的安全风险及监管现状[J]. 中国信息安全, 2023(8): 69-72.

究方向: IP 网络技术、软件功能测试、软件代码审查、网络设备测试等。

储志强(1981—), 男, 内蒙古杭锦后旗人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 计算机软件开发、大数据、信息化、项目管理等。

张俊霞(1977—), 通信作者(email: zhangjunxia@caict.ac.cn), 女, 河北邢台人, 硕士, 部门主任, 研究方向: 科技创新、知识产权、标准化工作、专利保护等。

张雷(1984—), 男, 黑龙江伊春人, 硕士, 高级项目经理, 研究方向: 信创、数据通信、IP 承载网、SDN/NFV、云网融合、下一代互联网等。

李红阳(1986—), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士, 经济师、工程师, 研究方向: 互联网、移动互联网、工业互联网、5G生态等。

(收稿日期: 2024-03-08)

## 【作者简介】

刘述(1972—), 男, 北京人, 硕士, 主任工程师, 研

脉冲宽度调制信号控制直流减速电机的转速和转向，使得小车能够快速、准确和稳定地停止在水平的跷跷板上。

### 1 平衡小车的控制目标

图 1 为跷跷板平衡状态，平衡小车的控制目标如下。

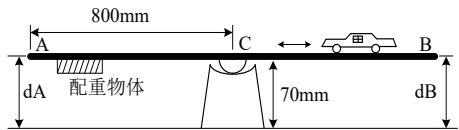


图 1 跷跷板平衡小车

(1) 在无配重物情况下，小车从 A 点出发，30 s 内行至 C 点附近。(2) 在 60 s 内，通过调整小车位置，使得跷跷板处于水平状态，保持 5 s 后给出明显的平衡指示。(3) 在 AC 之间任意位置添加配重物，在 60 s 内小车使得跷跷板再次处于水平状态，保持 5 s 后给出明显的平衡指示。(4) 在整个行驶过程中，小车始终在跷跷板上，并分阶段实时显示运动时间。

### 2 平衡小车系统硬件设计

平衡小车的控制系统总体结构框图如图 2 所示。STM32F103 单片机为控制核心，采用 2 节 18650 锂电池供电，总电压为 7.4 V，外接 TCRT5000 红外循迹传感器、MPU6050 角度传感器模块、L298N 电机驱动板模块、4 位一体 TM1637 数码管显示模块和 LM2596S 降压电源模块。小车车体采用 4 个 48:1 减速比的直流减速电机。

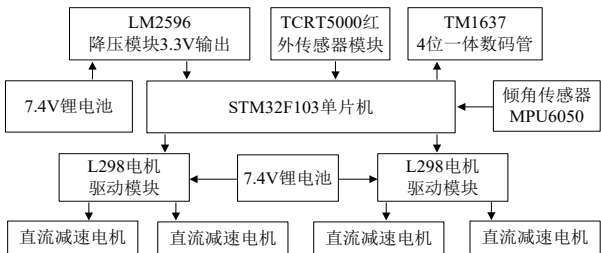


图 2 平衡小车系统总体结构框图

平衡小车的工作原理如下：小车初始位于跷跷板 A 点，STM32F103 单片机每 10 ms 读取一次串口数据，获得倾角传感器 MPU6050 模块输出的跷跷板倾斜角度值，经 LADRC 控制器处理后，输出控制信号控制小车的前进和后退，使得跷跷板平衡。跷跷板中心轴上粘贴了黑色电工绝缘胶布引导小车行驶，在小车行驶过程中，采用红外传感器循迹约束小车不从跷跷板上掉落，数码管分阶段显示小车行驶时间。

#### 2.1 控制器

平衡小车系统采用 32 位单片机 STM32F103C8T6 为控制核心。该芯片采用 Cortex-M3 内核，集成了多个定时器和串口，具有高性能、低功耗、易于开发等优点。STM32F103C8T6 完全兼容 51 系列单片机，工作频率为 72 MHz，内置高达

128 kB 的 Flash 存储器和 20 kB 的 SRAM，具有丰富的通用 I/O 端口，其性能远高于 51 系列单片机。采用该芯片可以很好地满足多个定时器、多个串口、高运算速度的要求，完成小车的实时控制任务。

#### 2.2 角度传感器模块

实时准确地采集跷跷板的角度值，是实现小车动作精准控制的基础。本系统采用 MPU6050 传感器模块采集角度值，模块内部集成了姿态解算器，配合动态卡尔曼滤波算法，能够在动态环境下准确输出模块的当前姿态，姿态测量精度可达 0.01°。不同于常规的采用 I<sup>2</sup>C 协议读取 MPU6050 芯片的输出结果，该模块集成的处理器在读取 MPU6050 测量数据后通过串口输出，采用 115 200 的波特率，输出频率为 100 Hz，每隔 10 ms 可以输出一组完整的角度数据。

#### 2.3 循迹模块

采用反射式红外传感器 TCRT5000 模块检测跷跷板上的黑色电工绝缘胶布。电路图如图 3 所示。TCRT5000 模块的红外发射二极管不断发射红外线，当发射出的红外线遇到板面的黑胶布时，被反射回来的红外线强度很低，红外接收管处于关断状态，红外接收管的输出电压经电压比较器处理后使得模块的输出端为高电平。如果发射的红外线遇到木板，红外线被反射回来的强度足够大，红外接收管饱和，模块的输出端为低电平。根据模块输出的高低电平，实现板面黑线的检测。图 3 中 RV1 可调电阻可调节电压比较器 LM393 的反相输入端参考电压，D3 是电源指示灯，D4 是模块输出低电平指示灯。

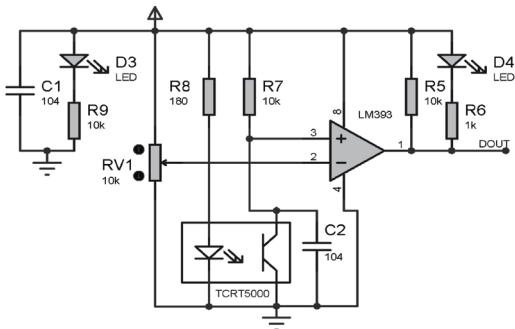


图 3 红外传感器电路原理图

#### 2.4 电源模块

直流减速电机采用 L298 专用电机模块驱动，需要 5 V 以上的电压供电，控制器单片机 STM32F103 采用 3.3 V 供电，因此采用了 2 节可重复充电的 18650 型锂电池串联后得到 7.4 V 电压，直接给 L298 模块供电。7.4 V 电压经过可调降压模块 LM2596S 降压后给单片机供电。其它需要 5 V 供电的模块，如数码管、循迹模块、角度传感器模块则采用 L298 专用电机模块上自带的 7805 稳压芯片输出 5 V 供电。经过多

次小车平衡实验后证实锂电池电量充足, 电压衰减小, 无需另外设置电源电压监测电路。

## 2.5 数码管显示模块

小车各个阶段的行驶时间显示可以采用数码管、液晶屏、OLED 屏。考虑到 OLED 屏显示面积过小, 不容易观察, 液晶屏体积和质量都较大, 因此采用了 I<sup>2</sup>C 接口的 4 位一体数码管模块。驱动芯片为 TM1637, 内部集成有 I<sup>2</sup>C 接口、数据锁存器、LED 高压驱动等电路, 只占用单片机 2 个 I/O 引脚就可以实现读写控制, 无需单片机资源就可实现动态显示, 也不用写脉冲宽度调制程序, 就可以直接调节数码管的亮度。

## 3 线性自抗扰控制器 (LADRC) 原理

针对平衡小车设计线性自抗扰控制器 (LADRC), 结构图如图 4 所示, 主要包含线性状态误差反馈控制律 (linear state error feedback) 和线性扩展状态观测器 (linear extended state observer)。LADRC 控制器利用误差反馈进行控制, 其核心是利用线性扩张状态观测器 LESO 估计系统的总扰动<sup>[2]</sup>。

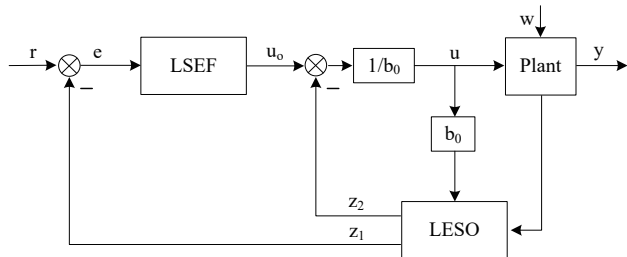


图 4 一阶 LADRC 控制器结构图

### 3.1 一阶系统的状态方程

将平衡小车系统作为一阶控制对象, 式 (1) 是一阶系统的状态方程。

$$\dot{y} = bu + f_1(y, w, t) \quad (1)$$

式中:  $u$  为控制量,  $y$  为系统输出,  $w$  是系统外扰,  $b$  为系统输入量的控制增益, 是系统的固有参数,  $b$  通常部分可知, 已知部分记为扰动补偿系数  $b_0$ , 通常可由系统阶跃响应的初始加速度导出<sup>[3]</sup>。式 (1) 可改写为:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= bu + f_1(y, w, t) = b_0 u + (b - b_0)u + f_1(y, w, t) \\ &= b_0 u + f(y, w, t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: 函数  $f$  表示系统的总扰动, 包含了内部扰动和外部扰动。选取状态变量  $x_1 = y, x_2 = f, h = \dot{f}$ , 即  $\dot{x}_1 = \dot{y}, \dot{x}_2 = \dot{f}$ , 此处  $x_2$  为跟踪系统总扰动而扩张的系统状态变量, 将式 (2) 改写为状态空间表达式为:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Eh \\ y = Cx \end{cases} \quad (3)$$

式中: 状态矩阵  $A$ 、输入矩阵  $B$ 、输出矩阵  $C$ 、扰动传递矩阵  $E$  分别为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0], E = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 3.2 设计系统状态观测器

利用系统输入  $u$  和系统输出  $y$  作为状态观测器的输入,  $\hat{y}$  为状态观测器的输出, 对式 (3) 所表示的系统设计状态观测器, 其状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 \\ -\beta_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 & \beta_1 \\ 0 & \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $z$  是观测器的状态变量,  $L = [\beta_1 \quad \beta_2]^T$  为需要整定参数的观测器误差反馈增益矩阵。将式 (5) 整理后可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 \\ -\beta_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 & \beta_1 \\ 0 & \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} \quad (6)$$

将特征方程的极点配置于相同的位置  $-\omega_0$  ( $\omega_0$  为观测器带宽) 处, 则可得:

$$\begin{aligned} \lambda(s) &= |sI - (A - L \times C)| = \begin{vmatrix} s + \beta_1 & -1 \\ \beta_2 & s \end{vmatrix} = s^2 + \beta_1 s + \beta_2 \\ &= (s + \omega_0)^2 = s^2 + 2\omega_0 s + \omega_0^2 \end{aligned} \quad (7)$$

因此, 观测器增益矩阵参数  $\beta_1 = 2\omega_0, \beta_2 = \omega_0^2$ 。

### 3.3 系统控制量

采用如下控制律作为系统控制量<sup>[4]</sup>:

$$u = (u_0 - z_2) / b_0 \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (2), 可得

$$\begin{aligned} \dot{y} &= b_0 u + f(y, w, t) = b_0 (u_0 - z_2) / b_0 + f(y, w, t) \\ &= u_0 - z_2 + f(y, w, t) \end{aligned} \quad (9)$$

由于  $z_2$  是观测器的状态变量, 可跟踪原系统状态变量  $x_2$  的变化, 而  $x_2 = f$ , 因此式 (9) 可表示为:

$$\dot{y} = u_0 \quad (10)$$

因此, 系统可简化为单积分器系统。可见, 自抗扰控制就是将各种非标准被控对象简化为标准的纯积分型系统来控制。线性状态误差反馈控制律采用式 (11) 所示的比例控制, 无需积分环节, 也可以消除稳态误差。式 (11) 中,  $r$  为系统给定输入, 即控制目标,  $k$  为比例系数。

$$u_0 = k * e = k(r - z_1) \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (8) 可得系统控制量计算公式:

$$u = [k(r - z_1) - z_2] / b_0 \quad (12)$$

## 4 平衡小车系统软件设计

平衡小车控制系统的软件包含主程序和若干子程序。为方便调试, 先检测自锁按键的状态, 如果自锁按键按下, 上位 PC 机通过串口传输 LADRC 控制器参数至单片机, 避免每次修改参数都要重新烧写程序至单片机。其它子程序包括角度采样子程序、显示子程序、LADRC 算法子程序、PWM 定时处理子程序等。在 keil c51 中编程和调试<sup>[5]</sup>。图 5 为系统主程序流程图。

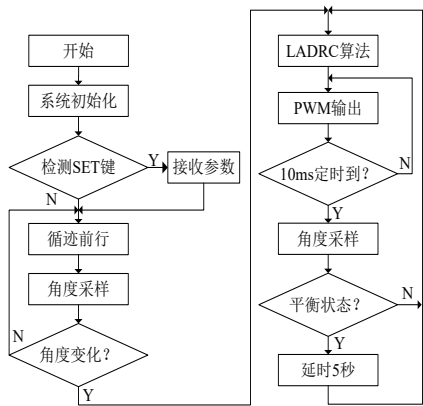


图 5 平衡小车主程序流程图

单片机上电后系统初始化，如 I/O 端口初始化、时钟初始化、定时器初始化等，然后检测 SET 键是否按下，如果按下 SET 键，检测到对应引脚为低电平后，等待串口传送 LADRC 控制器参数，接收到串口传送停止指令后，小车循迹行驶，同时读取 MPU6050 传感器输出的角度值，当角度值发生明显变化时，判断小车到达跷跷板中点 C 位置，然后进入平衡控制子循环程序。LADRC 控制器根据式 (12) 计算控制量，然后将控制量转换为 PWM 信号控制小车采用合理的速度前进或后退，采样频率为每 10 ms 读取一次角度值，如果角度值在平衡角度  $\pm 1^\circ$  范围内，则认为达到平衡状态，延时 5 s 后再次进入平衡控制子循环程序。在平衡状态下，LADRC 算法输出的 PWM 控制量几乎为零，小车静止。在非平衡状态下，小车在 LADRC 算法输出的 PWM 控制量下移动，直到平衡为止。

LADRC 控制算法的编程是软件设计的核心。编写 LADRC 算法时，首先初始化前文所述的扰动补偿系数  $b_0$  和观测器误差反馈增益矩阵  $L = [\beta_1 \ \beta_2]^T$  参数值，确定采样周期，然后根据式 (6) 计算观测器状态变量  $z_1$ 、 $z_2$  的值，最后根据式 (12) 计算控制量  $u$ ，将控制量转换为 PWM 信号输出给电机即可。

5 实验结果分析

图 6 为跷跷板平衡小车实物图，平衡小车实验结果如表 1 所示，图 7 中纵坐标是 MPU6050 传感器输出的角度值、单位度、目标值是 0。

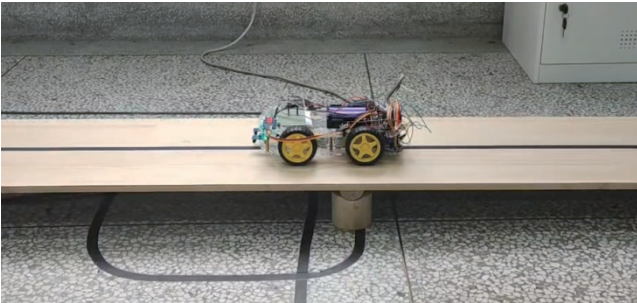


图 6 跷跷板平衡小车

表 1 测试结果

| 次数         | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|------------|------|------|------|------|------|
| 到 C 点时间 /s | 6    | 7    | 6    | 6    | 7    |
| 平衡调整时间     | 23   | 22   | 24   | 22   | 23   |
| dA-dB/mm   | 15.6 | 14.2 | 18.4 | 19.1 | 16.8 |

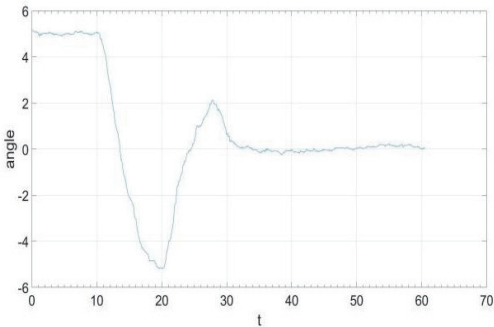


图 7 平衡小车角度变化曲线图

角度传感器输出的极限值约为  $\pm 5^\circ$ 。横坐标是采样时间，横坐标上的数字 10 表示 10 s。控制器参数取采样周期  $h=0.05$  s、 $\beta_1=5$ 、 $\beta_2=6.25$ 、 $b_0=0.62$ 。在实际测试中，采样周期对控制效果的影响较为明显，MPU6050 模块的固定方式对其输出值有一定的影响。

6 结论

在平衡小车的控制中，基于 STM32F103 单片机的 LADRC 自抗扰控制器控制效果良好，相比常规的 PID 控制器，其调节时间更短、超调量更小；在相同外部扰动作用下，LADRC 比传 PID 鲁棒性更好。在难以建立精确的系统模型时，LADRC 将内外总扰动的信息隐藏在状态观测器的输出估计误差中，从而将系统转换为纯积分系统，具有很高的实用价值。

参考文献：

[1] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002(3): 13-18.

[2] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京: 中国科学院数学与系统科学研究院, 2003.

[3] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference, Volume 6 of 6. Evanston: American Automatic Control Council, 2003: 4989-4996.

[4] 朱斌. 自抗扰控制入门[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017.

[5] 马忠梅, 张凯. 单片机 C 语言应用程序设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.

【作者简介】

朱品伟 (1980—)，男，江苏常州人，硕士，副教授，研究方向：嵌入式系统的应用与开发。

(收稿日期：2024-03-12)