

基于改进单神经元PID算法的平衡小车控制^{*}

项思哲 周依涛 郑炜炀 高金凤

(浙江理工大学机械与自动控制学院 杭州 310018)

摘要: 针对平衡小车强耦合、非线性和自然不稳定等特点以及常规PID控制时存在的平衡困难、可靠性低等缺陷,将常规的PID控制与单神经元控制思想相结合,通过平衡小车装置输入的误差值,根据学习规则自我学习、在线调整各控制环节参数并进行比例、积分和微分控制,再由模糊控制器对其增益系数进行自整定,以此提升系统的自适应能力。最后,通过MATLAB仿真,将所提出的控制器与常规PID控制器进行对比,验证了所提出方法的优越性,并得出改进后的单神经元PID控制器具有较好的跟踪性能和抗干扰能力。

关键词: 平衡小车;PID控制器;改进单神经元PID控制器;MATLAB仿真

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8

Balancing trolley control based on improved single neuron PID algorithm

Xiang Sizhe Zhou Yitao Zheng Weiyang Gao Jinfeng

(School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In view of the characteristics of strong coupling, non-linearity and natural instability of the balancing car and the defects of the conventional PID control, the balance is difficult and the reliability is low. Analyses the conventional PID control and single neuron control, the combination of value through balancing the car unit of input error, according to the rules of self learning, adjust each parameter and control links in proportion, integral and differential control, again by self-tuning fuzzy controller on the gain coefficient, thus improve the adaptive ability of the system. Finally, through MATLAB simulation, the controller proposed is compared with the conventional PID controller, which verifies the superiority of the proposed method. And the improved single neuron PID controller has better tracking performance and anti-interference capability.

Keywords: balancing car;PID controller;improved single neuron PID controller;MATLAB simulation

0 引言

近年来,随着人工智能的发展,机器人技术在工业领域和民用领域取得重要应用^[1]。因此,对于机器人的研究,得到了广大科研爱好者和诸多学者的广泛关注。从20世纪开始,人们已经对移动机器人展开研究,并将移动机器人广泛应用到生产生活等各个领域。在生活中,由于汽车体积较大,找车位难等问题,平衡小车以其整体控制灵活,运行操作简单,能源消耗大大降低以及符合绿色环保等优势,成为人们平时代步的交通工具^[2]。

平衡小车作为一个复杂的系统,其包括了智能控制、自动控制、传感技术、检测技术以及电子设计技术等方面的知识^[3]。通过对平衡小车的学习和研究,有助于帮助初学者掌握自动控制和嵌入式技术的基本方法和其他方面知识的

综合应用,帮助初学者提高理论应用和技术开发设计等能力^[4]。

对于平衡小车的研究,周冲等^[5]提出通过PID控制算法实现对角度和电机的控制,得到其算法原理简单,应用范围广等结论。但此控制方法在平衡位置附近会存在震荡现象,静态特性不佳。杜丽敏等^[6]提出采用PD控制算法构成系统姿态控制内环,用PI控制算法构成系统速度控制外环,形成双闭环串级PID控制系统,实现了对平衡小车的稳定控制。李声福等^[7]将卡尔曼滤波器和互补滤波器相结合,有效实现了小车姿态的准确识别,提高了平衡小车的鲁棒性和准确性。韩帅等^[8]设计了模糊自适应控制器,其对平衡小车的速度和角速度有较好的跟踪效果,得到该控制器具有实时性和稳定性等特点。

目前,国内外学者对于平衡小车的研究大多围绕于硬

收稿日期:2021-04-30

* 基金项目:浙江省自然科学基金(LY20F030015)项目资助

件设计以及简单经典智能算法的应用。这使得平衡小车缺少机器学习方面的研究以及改进智能算法的方式。

在上述研究理论的基础上,本文针对平衡小车进行研究,对各种控制算法进行分析讨论,考虑采用神经网络学习在线调节控制环节参数的方式提升小车的自适应性,并结合数值仿真,提出了一种基于改进单神经元PID算法的平衡小车控制方案。

1 平衡小车模型

1.1 结构组成

平衡小车的组成主要包括小车底板、编码器直流电机及轮子,具体实物如图1所示。小车底板上分别固定有STM32F103C8T6核心控制板、稳压模块、TB6612电机驱动、电源、蓝牙、MPU6050、OLED显示屏等。

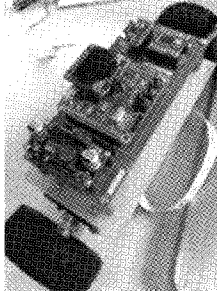


图1 平衡小车实物示意图

控制平衡小车用到的传感器主要有MPU6050六轴姿态模块和光电编码器,MPU6050六轴姿态模块用于采集小车的姿态信息,而编码器则采集小车的速度值,传感器将小车的姿态和速度信息实时传送给STM32F103C8T6核心控制板,并将信息显示在OLED显示屏上。核心控制板内置处理控制器,接受并处理输入信号后,输出控制信号通过TB6612驱动模块对电机进行驱动,从而实现对平衡小车的控制。此外,还可通过蓝牙模块无线控制平衡小车的移动。系统结构如图2所示。

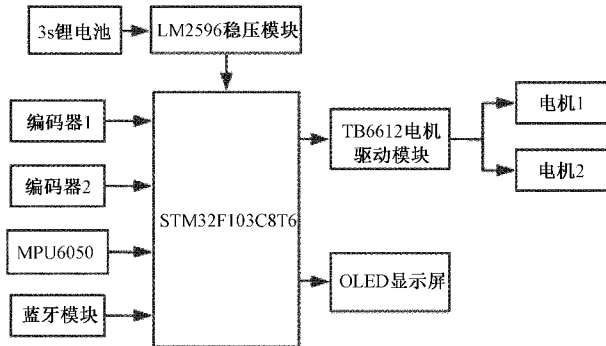


图2 平衡小车控制系统结构

1.2 模型建立

为更有效地控制平衡小车的稳定,首先对平衡小车的物理模型进行分析。已知平衡车高度为 l ,质量为 m ,可将

其抽象成一级倒立摆^[9],并将其置于可水平移动的小车上,其物理模型如图3所示。

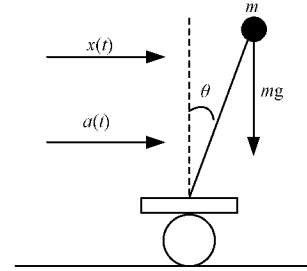


图3 平衡小车物理模型

图3中 $x(t)$ 表示受外力干扰时车体的角加速度, $a(t)$ 表示车轮的移动加速度。根据图3受力分析后,可知小车的运动微分方程表达式为:

$$l \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} = g \sin[\theta(t)] - a(t) \cos[\theta(t)] + l \cdot x(t) \quad (1)$$

当倾角较小时,可以对上述公式进行线性化处理:令 $\cos(\theta) \approx 1, \sin(\theta) \approx 0$,则运动方程化简为:

$$l \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} = g \cdot \theta(t) - a(t) + l \cdot x(t) \quad (2)$$

当小车静止时,车轮加速度为 $a(t)=0$,所以可由小车静止时的运动方程得到系统的传递函数:

$$H(s) = \frac{\theta(s)}{X(s)} = \frac{l}{ls^2 - g} \quad (3)$$

式中: $\theta(s)$ 为平衡小车的输出角度; $X(s)$ 为平衡小车的输入加速度。

通过测量实验室平衡小车的相关参数,得到: $l=0.03 \text{ m}$,并且重力加速度近似取值为 $g=9.8 \text{ N/kg}$ 。由此,得出平衡小车具体的传递函数为:

$$H(s) = \frac{\theta(s)}{X(s)} = \frac{0.03}{0.03s^2 - 9.8} \quad (4)$$

由奈奎斯特稳定判据可知,该系统不稳定。小车在静止状态下不能保持平衡,由此需要设计合适的控制器对小车施加外力,使其能够保持平衡。

2 控制器设计

2.1 PID控制器设计

PID控制器根据目标值与实际输出的反馈量构成控制偏差。将偏差进行比例、积分和微分运算得到输出量,进行控制。

在常规PID控制算法中,输出 $u(t)$ 与误差值 $e(t)$ 有着如下关系:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

式中: K_p, K_i, K_d 分别为比例、积分和微分系数; $u(t), e(t)$ 分别为输出量与偏差量。

由于平衡小车通过 MPU6050 和编码器进行反馈信号的采集且采用数字信号控制,因此需要对上述常规 PID 控制算法公式进行离散化处理^[10],得到公式:

$$\begin{cases} u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=1}^k e(i) + K_d [\Delta e(k)] \\ \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \end{cases} \quad (6)$$

PID 控制的性能主要取决于 K_p 、 K_i 、 K_d 的取值。 K_p 决定系统的动态性能,增大 K_p 可提高系统响应速率,但 K_p 过大则会加剧振荡,使系统稳定性能变差^[11]。 K_i 决定系统的稳态误差,增大 K_i 可消除系统的稳态误差,加快调节速度,但 K_i 过大会使系统调节时间增加甚至出现超调^[12]。 K_d 对系统起到提前校正的作用,有助于系统减小超调量,减少振荡次数,但 K_d 过大会影响系统的抗干扰能力^[13]。合适的 K_d 可提升小车的稳定性,使其具有一定的载重能力。

2.2 单神经元 PID 控制器设计

1) 常规单神经元 PID 控制器

单神经元 PID 自适应控制器的结构如图 4 所示。期望控制器信号 $r(k)$ 和被控对象输出信号 $y(k)$ 经过转换器,得到神经元学习所需的状态量 x_1, x_2, x_3 :

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k) \\ x_2(k) = e(k) - e(k-1) \\ x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $e(k) = r(k) - y(k)$ 。

第 k 时刻输入被控对象的控制信号 $u(k)$ 为:

$$u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 \omega'_i(k) x_i(k) \quad (8)$$

$$\omega'_i = \omega_i(k) / \sum_{i=1}^3 |\omega_i(k)| \quad (9)$$

式中: $\omega_i(k)$ 为对应 $x_i(k)$ 的权系数; K 为神经元的增益系数,且 $K > 0$ 。

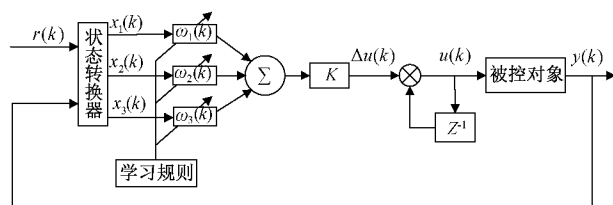


图4 单神经元 PID 自适应控制器结构

单神经元 PID 控制实现自适应控制的关键在于控制器可自主学习并在线调节各分量加权系数 ω_i 的值,相当于对 PID 的比例、积分、微分环节控制强度进行了自适应调节^[14]。本文单神经元 PID 控制器采用有监督的 Hebb 学习规则,具体学习规则如式(10)所示。

$$\begin{cases} \omega_1(k+1) = \omega_1(k) + \eta_i u(k) e(k) x_1(k) \\ \omega_2(k+1) = \omega_2(k) + \eta_p u(k) e(k) x_2(k) \\ \omega_3(k+1) = \omega_3(k) + \eta_d u(k) e(k) x_3(k) \end{cases} \quad (10)$$

式中: η_i 为积分学习速率; η_p 为比例学习速率; η_d 为微分学习速率。

考虑到在控制过程中 PID 参数的在线学习主要与 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 有关,故对加权系数学习规则进行优化,将 $x_i(k)$ 用 $e(k) + \Delta e(k)$ 代替^[15]:

$$\begin{cases} \omega_1(k+1) = \omega_1(k) + \eta_i u(k) e(k) [e(k) + \Delta e(k)] \\ \omega_2(k+1) = \omega_2(k) + \eta_p u(k) e(k) [e(k) + \Delta e(k)] \\ \omega_3(k+1) = \omega_3(k) + \eta_d u(k) e(k) [e(k) + \Delta e(k)] \\ \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \end{cases} \quad (11)$$

单神经元 PID 的学习速率 η_i 、 η_p 、 η_d 和增益系数 K 需要在实验中调整确定。 K 值越大,系统响应速率越快,但超调量越大。相反 K 值降低,系统调节步长减小,响应速率下降,系统稳定性提升^[16]。 η_i 、 η_p 、 η_d 控制各参数的学习速率,其值越大,对应环节的加权系数调节速率越快,但同时也会导致调节的准确率下降。

2) 单神经元 PID 控制器的改进

常规单神经元 PID 控制器由于增益系数 K 需要事先设定且运行时无法变化。对于平衡小车这样强耦合、自然不稳定的控制对象,往往需要控制器能够根据误差变化的实际情况来设定合适的增益系数,因此考虑采用模糊控制的方法来实现单神经元 PID 控制器增益系数 K 的自整定^[17],改进后的控制器结构如图 5 所示。

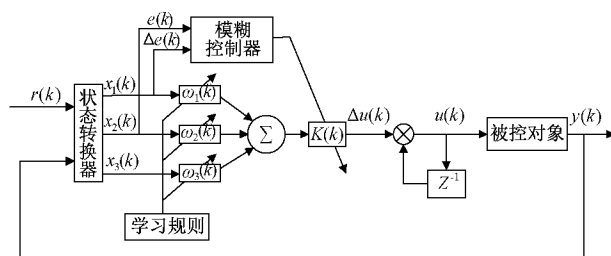


图5 改进单神经元 PID 自适应控制器结构

本文所设计的模糊控制器输入语言变量为误差值 $e(k)$ 和误差变化率 $\Delta e(k)$,输出语言变量为增益系数 K 。定义 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 的基本论域为 $[-6, 6]$, u 的基本论域为 $[0, 6]$, 注意调节控制器合适的量化因子和比例因子, e 和 Δe 的语言值设为 NB、NS、ZO、PS、PB, u 的语言值为 ZO、PS、PM、PB, 同时各语言变量隶属度函数采用三角形隶属度函数。本模糊控制器的控制目标是要使在系统误差较大时,保持增益系数 K 值较大以保证系统快速响应;而在系统趋近于稳定,误差下降时降低 K 的值以保证系统的稳定性。为此设计模糊规则如表 1 所示。

由此便完成了模糊控制器的设计,即对单神经元 PID 控制器的改进。改进后的单神经元 PID 控制器由于加入了模糊控制器对增益系数进行了自主的在线调节,使控制器的自适应能力得到进一步加强,同时解决了实际调试过程中增益系数 K 难以调节的问题。

表1 模糊控制器的判别规则

de	e				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB	PM	PS	ZO	PS
NS	PM	PM	ZO	ZO	PM
ZO	PM	PS	ZO	PS	PM
PS	PM	ZO	ZO	PM	PM
PB	PS	ZO	PS	PM	PB

3 仿真与分析

3.1 控制器设计仿真

输入被控对象的控制信号为平衡车加速度,输出为平衡车实际角度。

在 MATLAB 中用 Simulink 工具对常规 PID 控制和改进后的单神经元 PID 控制器进行模拟仿真。控制周期设为 0.01 s,目标值输入信号为目标角度,选择幅值为 1 的阶跃信号,正跳变时刻为 0 s。同时,选择脉冲宽度为 0.02 s,幅值为 20 的脉冲信号作为干扰信号,作用于被控对象。

对单神经元 PID 控制器建立 Simulink 仿真模型,在 3 s 时输入干扰信号。设阶跃响应稳态偏差允许范围为 $\pm 2\%$ 。

当采用常规 PID 控制器,经过一系列参数整定后,将 PID 参数确定为 $P=21, I=20, D=1$,得到结果如图 6 所示。

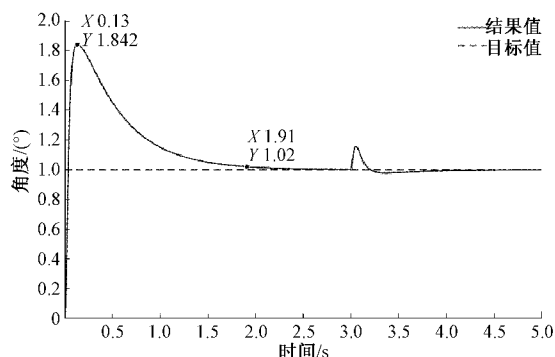


图6 PID 控制器仿真结果

采用单神经元 PID 控制器,经过调整后,设置 $\eta_p=12, \eta_i=0.8, \eta_d=2.5$,得到结果如图 7 所示。

3.2 结果分析

从上述仿真结果可以得出,常规 PID 控制器阶跃响应的超调量较大,达到 84.3%,调整时间为 1.91 s。改进后的单神经元 PID 控制器阶跃响应时,超调量为 0 且调整时间降为 0.2 s。观察 3 s 时输入干扰信号后的响应曲线,得到单神经元 PID 控制器的控制曲线波动更小且调整时间更短。因此得出相比于常规 PID 控制器,单神经元 PID 控制器在阶跃响应时有更快的响应速率和更好的跟踪性能。同时面对外界干扰时,单神经元 PID 控制器较之常规 PID 控

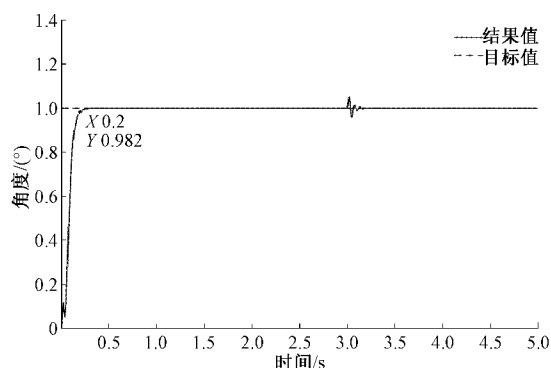


图7 单神经元 PID 控制器仿真结果

制器具有更好的抗干扰能力。

由于单神经元 PID 控制器会随系统变化而自行确定合适的参数。且改进后的单神经元 PID 控制器还做到了增益系数 K 自整定,从而做到了对全部重要参数的自适应调节,因此对比常规 PID 控制器具有更好的自适应能力。

4 结论

针对常规 PID 控制平衡小车存在稳定性、可靠性不足等问题,本文设计了改进单神经元 PID 控制器,以此提升平衡小车的稳定性。该控制算法通过设计学习规则在线调节各参数,并采用模糊控制调节单神经元的增益系数 K 。仿真结果表明,较之常规的 PID 控制,单神经元 PID 控制具有更好的响应速率,更好的跟踪性能和更强的抗干扰能力,同时在保留前者较好准确性等优势的同时兼具更高的动态性能和更好的自适应能力。

参考文献

- [1] 李姿景,张其琴,于俊杰,等. 基于单片机的两轮平衡车设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(23): 1-5.
- [2] 陈佳荟. 自平衡车的控制系统设计[J]. 电子世界, 2021(2): 156-157.
- [3] 贾树林,马双宝. 基于 STM32F429 两轮平衡车的研制[J]. 武汉纺织大学学报, 2020, 33(5): 57-63.
- [4] 从玉华,吴洪佳,朱惠娟,等. 两轮自平衡小车的设计及实现[J]. 电子技术与软件工程, 2020(19): 106-109.
- [5] 周冲,王振,陈贵茂. 智能平衡小车与 PID 控制算法[J]. 电脑编程技巧与维护, 2020(9): 128-130.
- [6] 杜丽敏,王岩. 基于单片机的两轮自动平衡小车系统的设计[J]. 长春大学学报, 2020, 30(12): 19-24.
- [7] 李声福,周恒,马超. 基于 STM32 的平衡小车控制系统设计[J]. 电子制作, 2020(19): 5-7.
- [8] 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.
- [9] 黄健,吕林涛. 两轮自平衡车控制系统设计[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(1): 95-97.

- [10] 吴振磊, 孙二威, 李笑笑. 一种基于 PID 算法的自平衡车控制系统设计[J]. 甘肃科技纵横, 2019, 48(8): 22-24.
- [11] 白喆, 王琪, 王晨. 基于模糊 PID 的级联式 Cuk 均衡技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(2): 52-55.
- [12] 蔡聪仁, 向凤红. 基于遗传算法优化 PID 的板球系统位置控制[J]. 电子测量技术, 2019, 42(23): 97-101.
- [13] 刘健伟, 翟秀文, 刘百合. 智能平衡车系统的设计与实现[J]. 科技创新导报, 2018, 15(32): 41.
- [14] 卜庆伟, 陈雄, 柴金宝, 等. 基于模糊神经网络 PID 的舵机控制系统[J]. 计算机与现代化, 2018(3): 1-5.
- [15] 陈宗帅, 李绍勇, 贺冬辰, 等. 基于改进单神经元 PID 算法的变风量空调系统三参数前馈解耦控制[J]. 制冷与空调(四川), 2020, 34(6): 655-663.
- [16] 周向阳, 时延君. 惯性稳定平台单神经元/PID 自适应复合控制与参数优化[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 189-196.
- [17] 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.

作者简介

项思哲, 在读本科, 主要研究方向为自动控制技术、图像处理与识别。

E-mail: 2018330301166@mails.zstu.edu.cn

周依涛, 在读本科, 主要研究方向为自动控制技术。

E-mail: zhou.y.t@foxmail.com

郑炜炀, 在读本科, 主要研究方向为图像处理与识别。

E-mail: 2018330301105@mails.zstu.edu.cn

高金凤(通信作者), 工学博士, 教授, 主要研究方向为先进控制理论与故障诊断技术。

E-mail: jfgao@zstu.edu.cn