

# 基于高阶滑模的自适应 Super-Twisting 控制系统设计

张旭中, 翟道远

(中国科学院湖州应用技术与产业化中心, 浙江 湖州 313000)

**摘要:** 目前设计的自适应 Super-Twisting 控制系统由于不具备抖振情况感知能力, 导致响应时间过长, 控制精度较低; 为了解决上述问题, 基于高阶滑模设计了一种新的自适应 Super-Twisting 控制系统; 系统硬件由采集模块、存储模块、控制模块、电路模块组成; 采集模块利用 AD8036 采集器, 主要负责采集 Super-Twisting 的控制参数, 并对控制信号进行调理, 存储模块选择 TDB7659 存储器, 主要负责存储由采集模块采集的控制参数数据, 控制模块是控制系统的核心, 主要由微控制器、D/A 转换器单元、信号输入通道、输出通道、电源单元组成, 控制系统的电路主要负责为各个模块提供所需的电压; 引入高阶滑模理论, 通过主程序完成系统初始化、设计 Super-Twisting 控制器、实现自适应 Super-Twisting 控制; 实验结果表明, 设计的基于高阶滑模的自适应 Super-Twisting 控制系统能够精准地削弱系统抖振, 响应时间均不超过 0.1 s, 电流控制精度、位置控制精度和速度控制精度都在 95% 以上。

**关键词:** 高阶滑模; 自适应 Super-Twisting; 控制系统; AD8036 采集器

## Design of Adaptive Super-Twisting Control System Based on High-Order Sliding Mode

ZHANG Xuzhong, ZHAI Daoyuan

(Huzhou Research and Industrialization Center for Technology, Chinese Academy of Sciences, Huzhou 313000, China)

**Abstract:** The currently designed adaptive Super-Twisting control system does not have the ability to sense the chattering conditions, resulting in too long response time and low control accuracy. In order to solve the above problems, a new adaptive Super-Twisting control system is designed based on the high-order sliding mode. The system hardware is composed of acquisition module, storage module, control module and circuit module. The acquisition module uses the AD8036 collector, which is mainly responsible for collecting the control parameters of Super-Twisting and conditioning the control signals. The storage module selects TDB7659 memory, which is mainly responsible for storing the control parameter data collected by the acquisition module. The control module is the core of the control system. It is mainly composed of a microcontroller, a D/A converter unit, a signal input channel, an output channel and a power supply unit. The circuit of the control system is mainly responsible for providing the required voltage for each module. By introducing the high-order sliding mode theory, the system initialization is completed through the main program, the Super-Twisting controller is designed, and the adaptive Super-Twisting control is realized. Experimental results show that the designed adaptive Super-Twisting control system based on the high-order sliding mode can accurately weaken system chattering, and the response time does not exceed 0.1 s, and the current control accuracy, position control accuracy and speed control accuracy are all above 95%.

**Keywords:** High-order sliding mode; adaptive Super-Twisting; control system; AD8036 collector

## 0 引言

滑模控制是一种非线性反馈控制方法, 该种方法的鲁棒性较强, 在理想状态下, 控制系统中的控制器可在一定时间内切换控制信号, 将其从一种状态切换到另一种状态, 然而在切换过程中, 控制器很容易出现抖动情况, 导致系统中其他硬件损坏, 使系统处于不稳定状态。为了减弱抖振情况, 并确保系统具有较强的鲁棒性, 国内的专家学者们展开了相关的研究<sup>[1-2]</sup>。

有学者利用二阶滑模算法设计了自适应 Super-Twisting

控制系统, 该系统利用二阶滑模算法提取了导数的边界值, 根据导数边界值的范围识别出控制系统需要的控制参数, 通过该参数实现自适应 Super-Twisting 的控制, 该系统的鲁棒性较好, 但在应用过程中, 控制参数的精度很难保证, 从而使控制系统的动态性能较差<sup>[3]</sup>。

还有学者提出了基于二次型 Lyapunov 函数的自适应 Super-Twisting 控制系统, 该系统利用二次型 Lyapunov 函数建立了 Super-Twisting 控制模型, 在模型受常值干扰的条件下, 对 Super-Twisting 进行收敛分析, 通过对控制模型优化计算出 Super-Twisting 收敛的时间, 该系统在实现

收稿日期: 2021-11-17; 修回日期: 2022-02-23。

作者简介: 张旭中(1983-), 男, 江苏无锡人, 大学本科, 工程师, 主要从事电气自动化、机械自动化和电子信息化方向的研究。

引用格式: 张旭中, 翟道远. 基于高阶滑模的自适应 Super-Twisting 控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(7): 129-134.

过程中由于缺少硬件设备极易受到不确定干扰，从而导致导数边界未知，对系统中存在的抖振情况不能有效削弱，对 Super-Twisting 的控制效果较差<sup>[4]</sup>。

本文为了加强对抖振情况的削弱，设计了基于高阶滑模的自适应 Super-Twisting 控制系统。分析了高阶滑模控制理论的工作原理，将这一技术应用到控制模块中，通过引入常规线性控制方式和自适应控制方法，优化系统的控制模块，在确定输入信号和输出信号的具体形式后，完成 Super-Twisting 控制，以两轮自平衡车为研究对象，进行实验仿真，验证控制系统的有效性。

## 1 自适应 Super-Twisting 控制系统硬件设计

### 1.1 采集模块设计

采集模块的核心设备为三星公司生产的 AD8036 采集器，该款采集器的采样频率较高，最高可达到 120 MHz，额定采样速率为 80 bit/s，控制信号经过 A/D 模数转换后，该款采集器的采样速率能提高到 140 bit/s，Super-Twisting 在经过滑模控制后，其控制参数由于导数边界未知，控制参数的大小会受到控制信号的影响而降低，为此采集模块需要先对控制信号进行调理，调理完成后再采集 Super-Twisting 的控制参数<sup>[5-6]</sup>。采集模块结构如图 1 所示。

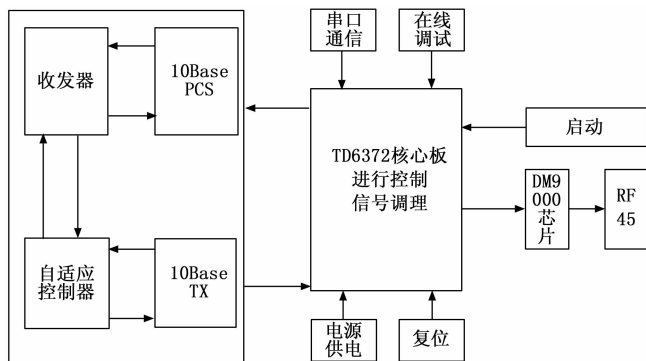


图 1 采集模块结构

观察图 1 可知，利用 DM9000 芯片连接 RJ45 实现信号的调理。利用 TD 公司生产的 TD6372 实现对控制信号的调理，将控制信号控制在 ADC 转换的电流范围内，TD6372 是一种放大器，可以快速且准确地进行脉冲响应，具有较高的分辨率，可作为 ADC 的缓冲器，ADC 为双通道模数转换器，性能好、功耗低，利用 TD6372 放大器对控制信号调理时，先通过 ADC 进行模数转换，转换完成后，对控制信号进行偏移匹配，完成后即完成控制信号的调理，再由采集器在导数边界未知的情况下，采集 Super-Twisting 的控制参数<sup>[7-8]</sup>。

### 1.2 存储模块设计

采集模块采集完成 Super-Twisting 控制参数数据后，这时如果控制系统不能及时接收该控制参数数据，导数边界数据会立刻更新而取代控制参数数据，导致控制参数数据丢失，为此必须对采集完成的控制参数数据进行高速存储<sup>[9]</sup>。存储模块结构如图 2 所示。

观察图 2 可知，存储模块的核心设备为 TD 公司生产的

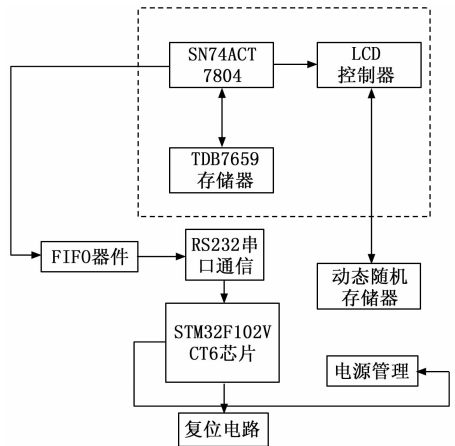


图 2 存储模块结构

TD6372 核心板，该存储器存储容量较大，一次可存储 256 kB 的数据，缓存速率能达到 128 Mbit/s，在存储器存储控制参数数据时，地址发生器能按顺序地进行输入和输出参数，并能按不同的速度读写参数数据。存储模块内部设置了 FIFO 器件，该器件为 SN74ACT7804，具有较高的存储速度，最高可达 50 MHz，在访问控制参数数据时时间可缩短为 15 ns，该 FIFO 器件可协助存储器缓存参数数据<sup>[10-12]</sup>。

存储模块的工作原理为：控制参数数据经过 USB 接口传输到存储模块后，经过电路传输到 FIFO 器件上，经过 FIFO 的缓存后，再通过存储器进行数据写入与读写，同时由存储器进行永久存储。

### 1.3 控制模块设计

通过高阶滑模实现控制，不仅能够保留传统滑膜控制的优点，提高控制精度，同时也可以防止出现抖动。控制模块引入了滑模控制器。滑模控制采用的非线性控制方法具有很强的鲁棒性，通过采集器获得被控制的对象和参数。选取的滑模动态不会受到对象动态特征参数和扰动影响，因此滑模能够在短时间内实现快速响应，完成参数变化的在线识别。

为了更好地消除滑模控制，利用饱和函数完成边界层的动态控制，在边界层中加入了正常的滑模控制，通过将边界层连续控制完成信息反馈，在反复调整边界层厚度后，缩小厚度，加强控制效果。

微控制器是控制模块的核心设备，该款控制器是由 TI 公司生产的功耗低、性能好的 MSC1210 控制器，其时钟频率最高可达 40 MHz，单周期指令执行速度为 6 m/s，其执行速度是 8 051 的三倍，同时，该款微控制器设有闪存存储器，存储容量为 16 kB，在电压较低时，可进行串行或并行编程，能够进行低压检测，此外，存储模块具有若干个端口，包括：SPI 端口、SDI 端口、UART 端口、USB 端口等。控制模块端口结构如图 3 所示。

D/A 转换器选用三星公司生产的 DAC8531，该款转换器功耗较低、单路，属于 16 位缓冲电压输出，D/A 转换器的时钟转换频率最高为 45 MHz，电压工作范围为 2.5 ~

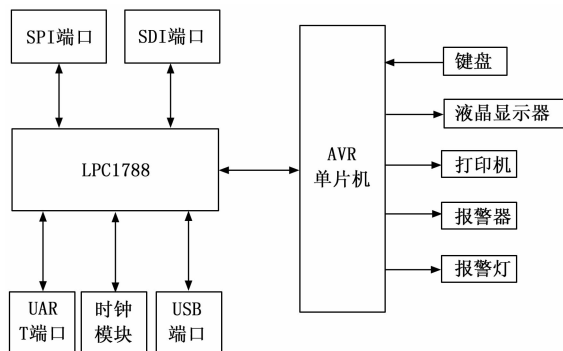


图 3 控制模块端口结构图

8.5 V, 通过 D/A 转换器, 将单片机输出的控制参数中的数字量转化成模拟信号, 进入信号输入通道。信号输入通道为 16 路, 可反映控制系统的电源状态、负载状态、电压状态、电流状态等, 信号输入通道后, 可对其进行信号调理, 调理结束后由信号输出通道输出, 信号输出通道可启动复位信号、极性信号等<sup>[13]</sup>。

通过常规线性控制方式完成滑模分析, 加强控制量增益来消除外界所带来的干扰。本文在控制模块中加入了观测器, 通过观测器分析外界的不确定干扰, 实现信息控制, 从而消除存在的抖振。观测器能够对外界的扰动状态进行估计, 根据估计结果得出合适的优化策略, 根据系统状态量的考虑结果, 直接分析被控制对象的负载力, 实现扰动分析。

为更好地完成信息控制, 本文在控制模块中引入了自适应方法, 在控制过程中, 增益不再设定为常数, 能够根据系统的运行状态完成随时调整, 即使系统没有达到滑动模态时, 也能够增加增益, 从而完成快速收敛, 实现控制工作。

#### 1.4 电路模块设计

电源模块的电压芯片为 SW1600, 该芯片的核心电压为 8.0 V, 幅值较低, 额定电流为 4.2 A, 要求具有较好的散热功能。电源模块电路图如图 4 所示。

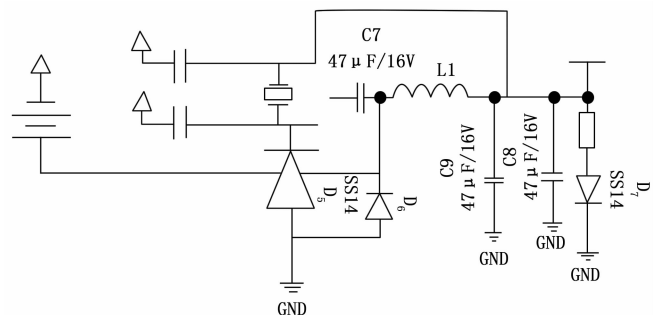


图 4 电源模块电路图

电源模块的输出电流为 3.2 A, 电压波动范围为 1.2~8.1 V, 系统中如果采集模块、存储模块、控制模块同时进行工作, 所需要的电压由电源模块按需进行分配, 电源模块中主供电电压为 13 V, 当对各个模块分配所需电压时, 电源模块选择集成电源模块, 该模块电流大, 输入与输出电压差可提高电压的转换效率, 根据各个模块的电压需求,

对各个模块的核心电压进行上电控制<sup>[14]</sup>。

## 2 自适应 Super-Twisting 控制系统软件设计

在完成硬件设计后, 引入高阶滑模理论设计软件程序。滑模控制为一种非线性控制方法, 其结构较为简单, 对参数及各类不确定干扰因素都不敏感, 具有较好的鲁棒性, 广泛应用于各种控制系统中<sup>[15-17]</sup>。本文采用高阶滑模, 主要通过该种算法设计 Super-Twisting 控制器, 以实现 Super-Twisting 的自适应控制。

基于高阶滑模的自适应 Super-Twisting 控制系统软件流程如图 5 所示。

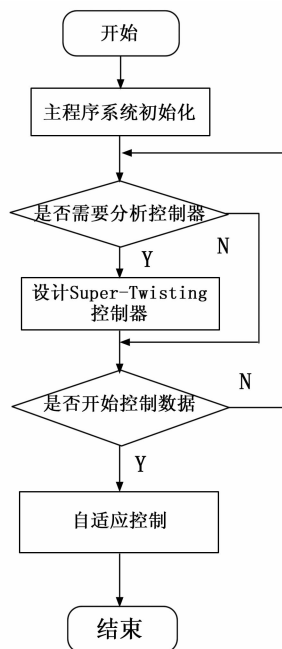


图 5 基于高阶滑模的自适应 Super-Twisting 控制系统软件流程

首先, 由主程序完成系统的初始化。系统中的主程序主要负责对控制系统中的硬件电路进行初始化, 消除时钟的延时, 合成频率, 并调整时钟相位, 同步到控制芯片上, 以此实现控制芯片内、外时钟控制的一体化。在初始化过程中, ADC 将采集器提供的 80 MHz 时钟信号合成为 16 MHz、75 MHz 的时钟并进行逻辑处理, 控制程序对参数数据的读写速度可调整到 30 bit/s, 通过输出通道进行输出<sup>[18]</sup>。采集信号通过虚拟控制定律可以得到, 采集过程得到的信号能够实现反步迭代控制, 信号输出模式为非线性模式, 满足虚拟控制规律。采集信号与输出信号的模式如图 6 所示。

根据图 6 可知, 数据的个数在不断增加, 最后达到  $50 \times 10^4$ , 数据数值的波动定点最高能够达到 4 800, 波动时间间隔为  $10 \times 10^4$ , 采集端信号与输出端信号存在较大的差异, 采集端的信号模式为不规则模式, 呈现明显的不规则波动, 而输出端信号能够保证信号与标准方式运行。

然后, 设计 Super-Twisting 控制器。Super-Twisting 滑模控制是在高阶滑模理论下实现, 属于 2-滑动控制器, 将

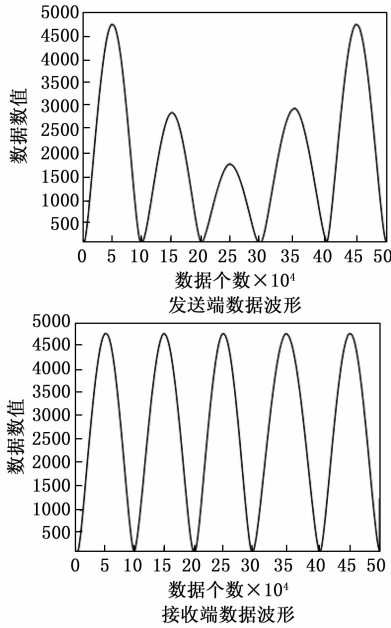


图 6 采集信号与输出信号模式

采集程序采集的控制参数数据转换为系统的控制量，将该控制量应用到导数中，通过下式进行表示：

$$\frac{dx}{dt} = a(x,t) + b(x,t)u, y = c(x,t) \quad (1)$$

式中， $u$  表示由采集程序采集的参数控制量； $x$  表示 Super-Twisting 滑模控制的收敛量； $y$  表示输入状态量； $a, b, c$  分别表示增益函数、未知函数与滑动变量函数； $t$  表示动态量。

本文研究的 Super-Twisting 控制系统阶数设定为 1，这样能够确保系统在运行过程中的连续性，防止出现滑模控制的抖振问题，分析 Super-Twisting 在公式 (1) 中的变量函数的平滑变量方式，与传统的 Twisting 算法相比，Super-Twisting 能够在短时间内实现滑模变量收敛，从而消除抖振问题。

通过滑动阶完成连续求导，分析运动动态的平滑度，确定约束条件，完成精准定义，在轨迹状态的交界处确定二阶滑模的动态形式，增加系统的鲁棒性，防止系统出现抖动。在 SOS 相平面上，设置有效的原点，确保系统是否能够围绕原点轨迹完成旋转，在有限的时间内，实现环绕收敛，在多次收敛中，确保系统能够恢复到原点。

Super-Twisting 能够利用切换装置完成信息切换，实现理想的切换，在控制过程中，设定控制量能够通过正常的方式显示在  $S$  中，使滑模面在工作过程中不会受到限制。

对本文设计的基于高阶滑模的自适应 Super-Twisting 控制系统来说，要想高效地实现 Super-Twisting 的自适应控制，就是在有限的时间内，在控制系统中找到一个状态控制量，这个状态控制量可表示为  $u = f(y, \bar{y})$ ，该状态控制量在驱动控制系统时，要处于原点  $y = \bar{y} = 0$  的平面内。在时钟频率为 80 MHz 的情况下，可获得控制器的增益，当特定增益为 0 时，可获得收敛率的控制器，当特定增益为 1，且反馈控制

量为 1 时，可以获得 Twisting 控制器<sup>[19]</sup>，该控制器可表示为一种不连续的滑动变量函数，用下式来表示：

$$\frac{du_i}{dt} = -K \operatorname{sgn}(y) \quad (2)$$

式中， $u_i$  表示控制系统中的反馈控制量； $K$  表示特定增益； $\operatorname{sgn}(y)$  为符号函数。

利用二阶滑模控制来消除系统运行过程的抖振，使系统能够维持二阶滑动状态，在有限的时间内完成信息收敛，系统运行过程中会存在多次收敛，因此能够实现分析。

最后，进行自适应控制。该 Twisting 控制器不需要设置变量导数，只要保证在进行自适应控制与收敛时，滑动面的稳定性处于标准范围即可<sup>[20-21]</sup>。当特定增益  $K$  增大到足够大时，可形成 STSM 控制器，该控制器是一个指数较为稳定的控制器，可协助 Super-Twisting 进行自适应控制，本文设计的自适应 Super-Twisting 滑模控制律  $u_i$  如下：

$$u_i = \frac{l}{b_0} (-u_j + u_w) \quad (3)$$

式中， $l$  表示状态估计变量； $b_0$  表示切换增益； $-u_j$  表示抖振变量； $-u_j$  表示常数<sup>[22-23]</sup>。

根据上述过程实现 Super-Twisting 控制，完成信息分析，通过高阶滑模控制改变信息在控制过程中存在缺陷定点改善，提高系统的运行能力<sup>[24-25]</sup>。

### 3 实验研究

为了验证本文设计的基于高阶滑模的自适应 Super-Twisting 控制系统的有效性，选用本文设计的系统与传统的基于二阶滑模算法的自适应 Super-Twisting 控制系统、基于二次型 Lyapunov 函数的自适应 Super-Twisting 控制系统进行实验对比。

本文选用的控制对象为两轮自平衡车，作为一种欠驱动系统，两轮自平衡车以一种非线性模式运行，能够完成不稳定工作，因此使用这种方法验证系统的实际应用效果。

为验证本文所设计的基于高阶滑动模态的自适应 Super-Twisting 控制系统的有效性，选取了基于二阶 Lyapunov 的自适应滑动模态控制器。试验对比 Super-Twisting 控制系统的性能。

选用的实验仿真参数如表 1 所示。

表 1 实验仿真参数

项目	参数
工作电压	200 V
工作电流	120 A
操作系统	Windows10
操作次数	10 次
编程语言	C++ 语言
工作频率	150 Hz

根据上述参数，进行仿真对比实验。

选用本文控制系统和传统控制系统进行对比实验，分别对信号的电流、位置和速度进行控制，得到的控制响应

时间实验结果如表 2 所示。

表 2 控制响应时间

实验次数/次	控制响应时间/s		
	二阶滑模算法	二次型 Lyapunov 函数	高阶滑模
1	2.15	3.14	0.05
2	2.30	3.25	0.07
3	2.42	3.22	0.06
4	2.25	3.08	0.04
5	2.27	3.16	0.07
6	2.39	3.24	0.03
7	2.53	3.33	0.05
8	2.64	3.27	0.06
9	2.45	3.52	0.08
10	2.55	3.29	0.06

根据表 2 可知, 在 10 次实验中, 3 种系统的响应时间不同, 本文所讨论的基于高阶滑模的自适应 Super-Twisting 控制系统的响应时间均不超过 0.1 s, 具有很好的控制效果, 而基于高阶滑模的自适应 Super-Twisting 控制系统, 其响应时间为 2~3 s, 以二阶李雅普诺夫函数为基础, 其响应时间为 3~4 s。由此可见, 本文提出的控制系统控制能力更强, 能够在短时间内实现响应, 具备实时响应能力。

在确定控制响应时间后, 对控制精度进行分析, 同时使用基于高阶滑动模态的自适应 Super-Twisting 控制系统、基于二次型 Lyapunov 函数的自适应 Super-Twisting 控制系统和基于二阶 Lyapunov 的自适应滑动模态控制器, 对两轮自平衡车进行平衡控制, 并通过仿真对比, 完成实验, 记录电流控制精度、位置控制精度和速度控制精度。

分析图 7 可知, 标准电流波动范围在 -42~42 A 之间, 基于二阶滑模算法的自适应 Super-Twisting 控制系统的电流波动范围在 -24~24 A 之间, 基于二次型 Lyapunov 函数的自适应 Super-Twisting 控制系统波动范围在 -36~36 A 之间, 本文提出的基于高阶滑模的自适应 Super-Twisting 控制系统电流波动范围在 -40~40 A 之间。由此可见, 本文提出的控制系统控制时间与标准值最为接近, 控制能力最好。

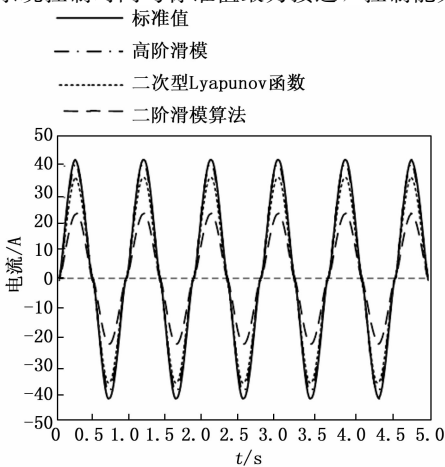


图 7 电流控制结果

分析图 8 可知, 随着时间的增加, 控制角度也会逐渐增大, 而基于二阶滑模算法的自适应 Super-Twisting 控制系统的偏离角度最大, 当控制时间为 5 s 时, 偏离角度为 0.8°, 基于二次型 Lyapunov 函数的自适应 Super-Twisting 控制系统的偏离角度为 0.65°, 本文提出的基于高阶滑模的自适应 Super-Twisting 控制系统的偏离角度仅为 0.1°, 能够保证系统正常运行。

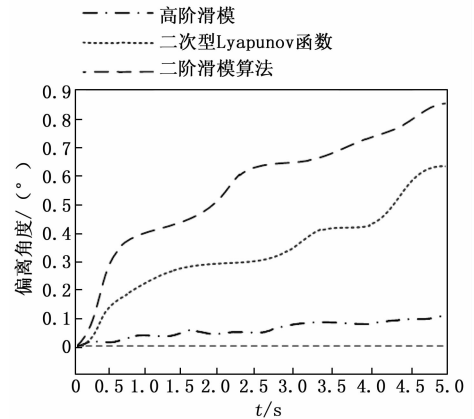


图 8 位置控制结果

分析图 9 可知, 在 10~15 s 之间速度出现一个峰值, 要想对其进行控制, 确保控制效果与标准值相符合较为困难。文中采用了基于高阶滑动模态的自适应 Super-Twisting 控制系统, 在 5 rpm 范围内实现。在此基础上, 基于二阶滑模算法的自适应 Super-Twisting 控制系统明显低于标准, 接近 25 rpm。第二级 Lyapunov 功能自适应 Super-Twisting 控制系统的标定大于 10 rpm。

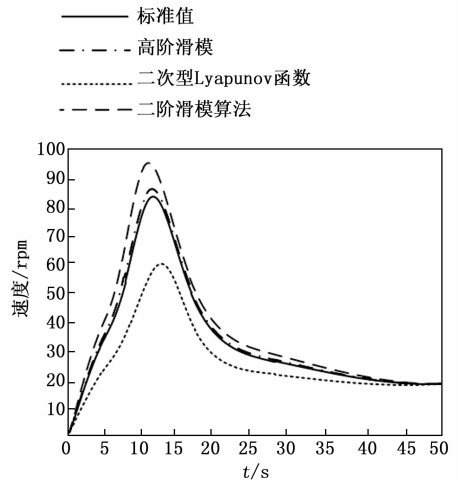


图 9 速度控制结果

综上所述, 基于高阶滑动模态的自适应 Super-Twisting 控制系统、基于二次型 Lyapunov 函数的自适应 Super-Twisting 控制系统和基于二阶 Lyapunov 的自适应滑动模态控制器都能够使自适应平衡车达到平衡状态, 可是在性能上却存在明显差异, 本文提出的系统与传统滑模方式相比, 控制的精度明显提高, 系统的整体响应能力更强, 能够在短时间内调整状态, 完成响应。3 种系统的控制性能如表 3 所示。

表 3 系统控制能力实验结果

	二次型 Lyapunov 函数控制系统	二阶 Lyapunov 控制系统	高阶滑动模态 控制系统
暂态调整时间/s	10	8	2
响应速度	慢	慢	快
抖振	大	小	很小

根据表 3 可知, 在使用 3 种滑模控制系统后, 两轮自平衡车显现出不同的性能。使用基于二次型 Lyapunov 函数的自适应 Super-Twisting 控制系统后, 平衡车仍然存在抖振, 即使系统步入稳态后, 这种抖振现象都没有得以缩减, 而基于二阶 Lyapunov 的自适应滑动模态控制器在减小抖振方面明显优于基于二次型 Lyapunov 函数的自适应 Super-Twisting 控制系统, 但是系统所选取的参数采用试凑法选择, 受到的制约因素较多, 尤其是在存在干扰状态下, 控制性能较弱。本文提出的控制系统在不受外界干扰影响, 利用高阶滑模完成控制, 使两轮自平衡车在运行过程中抖振现象得以明显减小。

本文提出的系统整体控制能力较强, 在无法确定是否存在干扰下, 仍然能够获得动态性能, 从而展示系统较好的鲁棒性, 在实际应用工程中具有很好的适用性。

#### 4 结束语

为了解决传统控制系统出现的问题, 本文设计了基于高阶滑模的自适应 Super-Twisting 控制系统, 在运用高阶滑模理论的情况下, 实现了 Super-Twisting 的自适应控制, 系统具有较好的鲁棒性与应用效果, 可以削弱系统中存在的抖振。本文引入了高阶滑模理论, 在确定滑模控制原理后, 完善控制模块, 使控制模块能够当作微分器使用, 提高系统的鲁棒性。在仿真实验中, 本文设计的系统展示出优异的控制性能, 对于之后研究观测器, 提供了重要的理论基础。但是本文系统在应用过程中忽视了采样周期对于控制性能的影响, 缺少对信号频率的考虑, 为了利用微分器提高滑块速度, 而忽略了噪声影响, 牺牲了积分消除运算, 容易出现不稳定。

由此可见, 本文系统还需要更多的完善, 在下次的研究中, 将重点对使用 Super-Twisting 的稳定性进行分析, 根据扰动理论和控制理论将扰动观测器与控制器结合, 防止外界干扰降低系统的鲁棒性, 引入自适应思想来提高系统的观测能力, 增强鲁棒性。

#### 参考文献:

- [1] 王旭东, 杨传江. 基于参数自适应二阶滑模观测器的 PMSM 控制 [J]. 电力电子技术, 2019, 53 (10): 48-52.
- [2] 皇甫宜耿, 郭亮, 梁艳, 等. 一种鲁棒双向直流变换装置的高阶滑模控制器 [J]. 控制理论与应用, 2019, 36 (3): 55-64.
- [3] 于涛, 赵伟, 杨昆. 基于 Super-Twisting 算法的欠驱动 RTAC 系统解耦滑模控制 [J]. 机电技术, 2020, (3): 2-5, 12.
- [4] 文成徐, 江驹, 余朝军, 等. 高超声速飞行器超螺旋滑模自

适应控制 [J]. 电光与控制, 2020, 27 (2): 5-9.

- [5] 张海燕, 王杰. 不平衡电网电压下双馈风力发电机高阶滑模控制方法 [J]. 电机与控制学报, 2019, 23 (4): 37-48.
- [6] 张谦, 李东. 带参数辨识的自适应二阶滑模观测器 PMSM 无传感器矢量控制 [J]. 控制与决策, 2019, 34 (7): 1385-1393.
- [7] 秦玉峰, 史贤俊, 翟禹尧, 等. 基于 ASTSMO 和 UIO 的故障估计方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46 (12): 62-72.
- [8] 李正平, 鲜斌. 基于虚拟结构法的分布式多无人机鲁棒编队控制 [J]. 控制理论与应用, 2020, 37 (11): 154-162.
- [9] 王树波, 任雪梅, 李斯琪, 等. 基于预设性能转台伺服系统的参数估计和自适应控制 [J]. 北京理工大学学报, 2019, 39 (2): 87-91.
- [10] 孙恺英, 李冬辉, 姚乐乐, 等. 基于新型超螺旋滑模自适应观测器的永磁同步电机转速估计策略 [J]. 高电压技术, 2020, 46 (11): 54-64.
- [11] 文成徐, 江驹, 余朝军, 等. 高超声速飞行器超螺旋滑模自适应控制 [J]. 电光与控制, 2020, 27 (2): 5-9.
- [12] 金一欢, 冯昊, 林俊, 等. 基于自适应高阶滑模的直气复合控制律设计 [J]. 空间控制技术与应用, 2020, 46 (1): 35-40.
- [13] 苗敬利, 郑大伟, 周重霞. 基于混合滑模控制器和反正切观测器的 SPMSM 直接转矩控制 [J]. 控制与决策, 2019, 34 (9): 1831-1839.
- [14] 马利花, 张业龙, 吴键, 等. 马钢棒材机架轴承频繁烧损原因分析及解决方案 [J]. 润滑油, 2020, 35 (3): 60-64.
- [15] 沈智鹏, 景富盛. 欠驱动船舶路径跟踪神经元自适应迭代滑模控制 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40 (3): 60-65, 71.
- [16] 崔晶, 刘芳璇, 张爱民, 等. 基于 Super-Twisting 观测器的制动缸自适应鲁棒控制 [J]. 电子设计工程, 2020, 28 (7): 6-9, 14.
- [17] 钱虹, 冯裕卿. 针对过热汽温控制的自适应预测控制器设计 [J]. 系统仿真学报, 2019 (5): 1002-1009.
- [18] 孙会琴, 韩佳炜, 崔晨, 等. 基于滑模控制的无刷直流电动机直接转矩控制 [J]. 河北工业科技, 2020, 37 (1): 44-51.
- [19] 段慧, 朱燕芳, 汪马翔, 等. 新能源并网功率智能控制系统的设计与应用 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43 (2): 147-156, 165.
- [20] 强子健, 鲁峰, 常晓东, 等. 基于二阶鲁棒滑模观测器的民用涡扇发动机气路故障诊断 [J]. 推进技术, 2020, 41 (6): 217-225.
- [21] 文元桥, 杨吉, 王亚周, 等. 无人艇自适应路径跟踪控制器的设计与验证 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40 (3): 482-488.
- [22] 皇甫宜耿, 郭亮, 梁艳, 等. 一种鲁棒双向直流变换装置的高阶滑模控制器 [J]. 控制理论与应用, 2019, 36 (3): 389-398.
- [23] 张海燕, 王杰. 不平衡电网电压下双馈风力发电机高阶滑模控制方法 [J]. 电机与控制学报, 2019, 23 (4): 37-48.
- [24] 王征宇, 鲜斌. 倾转式三旋翼无人机的有限时间收敛控制设计 [J]. 控制理论与应用, 2019, 36 (9): 1442-1452.
- [25] 陈祥兵, 王新华. 基于滑模变结构的无人直升机着舰控制研究 [J]. 兵工自动化, 2019, 38 (2): 11-15.