

基于扩张状态观测器的磁悬浮球连续滑模控制^①

赵 磊^② 王军晓^③ 黄光普 徐彬彬 俞 立

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

摘 要 针对磁悬浮球系统具有非线性、模型不确定性和易受干扰影响的特点,提出了一种基于扩张状态观测器(ESO)的连续滑模控制方法(CSMC)。该控制方法采用 ESO 对系统的扰动进行观测和估计,再将扰动估计值作为连续滑模控制器的补偿量,以克服不确定性和外界扰动的影响,进一步提升了连续滑模控制器的控制性能。仿真和实验验证了所提方法的有效性。结果表明,与连续滑模控制方法(CSMC)相比,ESO-CSMC 具有更强的抗干扰性能。

关键词 磁悬浮球系统;连续滑模控制(CSMC);扩张状态观测器(ESO);抗干扰性能

0 引 言

由于磁悬浮系统具有无机械磨损、无污染、无须润滑、系统可靠等优点,已被广泛应用到工业、航空、医疗等众多领域中,其中最具代表性的有磁悬浮列车^[1]、磁悬浮轴承^[2]、无轴承电机^[3]和磁悬浮飞机^[4]。但磁悬浮系统往往是多自由度的复杂非线性系统,其数学模型非常复杂,如磁悬浮列车,其构造复杂,具有多个自由度,运行速率高,对控制算法的可靠性、实时性提出了很高的要求。诸如此类的问题都给磁悬浮系统的高性能控制带来了巨大的考验。

相比于其他复杂多自由度磁悬浮系统,磁悬浮球系统则是一个典型的单自由度系统^[5]。它可以作为研究其他复杂磁悬浮系统的基础平台,使研究人员能更加专注于控制策略的研究。但磁悬浮球系统为复杂的非线性系统,具有开环不稳定性,而且容易受到外界因素的干扰,如风力和系统老化等,无法对其精确建模。所以设计一种简单、具有较强抗干扰能力且不完全依赖于系统精确模型的磁悬浮球控

制器是一件很有意义和挑战性的工作。近年来,已经有很多控制算法应用到磁悬浮球系统中,如 PID 控制算法^[6,7]、状态反馈控制算法^[8]、模糊控制算法^[9]、鲁棒控制算法^[10]、神经网络控制算法^[11]等。

由于滑模控制对系统的不确定因素具有良好的鲁棒性^[12],因此在磁悬浮球平台上也有很多研究和应用成果,如文献[13]采用等速趋近律实现了对磁悬浮球的控制,但控制过程中的非连续切换引起了较严重的抖振现象。文献[14]对滑模趋近律进行了分段处理,有效抑制了滑模面附近的抖振现象,并采用积分滑模控制消除了控制中存在的稳态误差。文献[15]通过仿真对比了稳态滑模控制与动态滑模控制的控制效果,体现了动态滑模控制器在抑制抖振现象和减小稳态误差方面的优良性能,但动态滑模控制器的设计较为复杂。文献[16]采用指数滑模趋近律设计了滑模控制器,在抑制抖振现象和减小稳态误差方面都取得了良好的效果,但该方法未考虑系统中存在的模型不确定性和外界扰动。

综上所述,滑模控制方法可以实现磁悬浮球的控制,但滑模控制的非连续切换会引起系统抖振,所以可以采用连续滑模控制来抑制抖振现象。又因为

① 国家自然科学基金(61803335)和浙江两化融合联合基金(U1709213)资助项目。

② 男,1998 年生,硕士生;研究方向:网络化运动控制;E-mail: zll17326024388@163.com

③ 通信作者,E-mail: wjx2017@zjut.edu.cn

(收稿日期:2019-05-09)

磁悬浮球系统具有非线性,而且易受外界扰动的影响,会使得系统建模不精确,这种情况下采用连续滑模控制方法会造成系统出现稳态误差,为了有效抑制扰动,提高控制精度,可以采用干扰观测器估计和消除扰动。目前,已经有很多干扰观测器被提出,如非线性干扰观测器^[17]、滑模干扰观测器^[18]、随机自适应干扰观测器^[19]、模糊干扰观测器^[20]和扩张状态观测器(extended state observer, ESO)^[21]等。本文结合连续滑模控制器与 ESO 设计了一种针对磁悬浮球系统的连续滑模控制器。仿真和实验结果表明,所提控制器在抑制抖振、减小稳态误差和抑制扰动等方面的性能均优于连续滑模控制器,具有更强的抗干扰性能。

本文结构如下,第 1 节给出磁悬浮球系统模型和问题描述;第 2 节介绍 ESO 及连续滑模控制器的设计过程,并对控制器进行稳定性分析;第 3 节设计仿真和实验对比 2 种控制方法的性能;第 4 节给出本文的结论。

1 系统模型及问题描述

1.1 磁悬浮球控制系统建模

本文所采用的磁悬浮球控制系统的结构如图 1 所示,其基本原理是通过改变施加到电磁铁上的电压或电流,以控制磁场强度的大小,进而使小球受到的磁力与其他外力相平衡,保持悬浮状态。由于系统是开环不稳定的,为了使小球能在设定的位置稳定悬浮,需要利用小球的状态反馈信息设计一个实时的控制器。

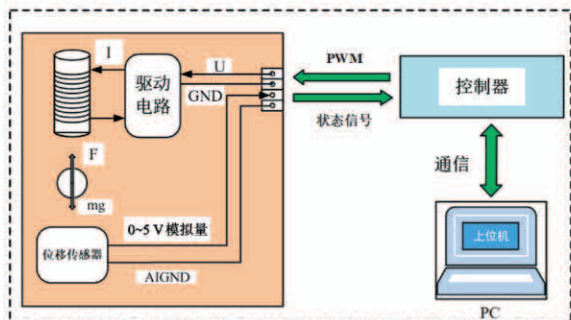


图 1 磁悬浮球系统结构图

由图 1 可知,磁悬浮球系统的数学模型可以描述为

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F(i, x) + mg \\ F(i, x) = K \left(\frac{i}{x} \right)^2, K = -\frac{\mu_0 A N^2}{4} \\ u(t) = K_a i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \\ mg + F(i_0, x_0) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, i 表示励磁线圈电流, x 表示小球位置, $F(i, x)$ 表示电磁力, $F(i_0, x_0)$ 表示平衡位置处的电磁力, $u(t)$ 表示功率放大器的输入电压。由于线圈电感 L 未知,因此将 $L \frac{di(t)}{dt}$ 项当做未知扰动处理。其余参数取值参照表 1。

表 1 磁悬浮球系统物理参数表

参数	符号	标称值(单位)
小球质量	m	0.17 kg
小球直径	D	0.06 m
线圈电阻	K_a	13.577 Ω
真空磁导率	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m
线圈匝数	N	1 057 匝
平衡位置	x_0	0.0425 m
平衡位置电流	i_0	0.633 A
磁导截面积	A	$\pi \times 9 \times 10^{-4}$ m ²

由式(1)可知,电磁力 $F(i, x)$ 与 i, x 之间的关系均是非线性的,将电磁力在平衡位置 x_0 处作泰勒级数展开,舍弃高阶项得:

$$\begin{aligned} F(i, x) &= F(i_0, x_0) + F_i(i_0, x_0)(i - i_0) \\ &\quad + F_x(i_0, x_0)(x - x_0) \\ &= F(i_0, x_0) + K \left(\frac{2i_0}{x_0^2} \right) (i - i_0) \\ &\quad - K \left(\frac{2i_0^2}{x_0^3} \right) (x - x_0) \end{aligned} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} &= K \left(\frac{2i_0}{x_0^2} \right) (i - i_0) - K \left(\frac{2i_0^2}{x_0^3} \right) (x - x_0) \\ &= K \left(\frac{2i_0}{x_0^2} \right) i - K \left(\frac{2i_0^2}{x_0^3} \right) x \end{aligned} \quad (3)$$

由式(1)、(3)可得小球位移 x 和功率放大器的输入

电压 $u(t)$ 的关系为

$$u(t) = K_a \frac{m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + K \left(\frac{2i_0^2}{x_0^3} \right) x(t)}{K \left(\frac{2i_0^2}{x_0^3} \right)} \quad (4)$$

对式(4)等号两边进行拉普拉斯变换,可得系统传递函数:

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{-\frac{1}{m} \frac{\mu_0 N^2 i_0 A}{2x_0^2 K_a}}{s^2 - \frac{1}{m} \frac{\mu_0 N^2 i_0^2 A}{2x_0^3}} \quad (5)$$

将表1数据带入式(5)可得:

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{-0.3}{s^2 - 61} \quad (6)$$

由式(6)可知,磁悬浮球系统可以近似为一个不稳定的2阶系统,因此,有必要设计一个闭环控制方法使得小球能够到达设定位置。

1.2 问题描述

实际上,由于功率放大器输出电流与电压的关系为典型的1阶惯性环节,而非比例关系,励磁线圈又是感性负载,铁芯具有磁阻,这些都会使系统模型存在不确定性,再加上外界扰动因素的干扰,因此很难取得良好的控制效果。考虑系统中存在的不确定性和未知外界扰动,结合系统的传递函数式(6),得到磁悬浮球系统的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_0 x_1 + b_0 u + f(x_1, x_2, u) + \tilde{d} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (7)$$

其中, $x_1 = x(t)$, $x_2 = \dot{x}(t)$ 分别为小球的位移和速度; $u(t)$ 为控制输入; a_0 、 b_0 为可调参数,初始值为 $a_0 = 61$ 、 $b_0 = -0.3$; $f(x_1, x_2, u)$ 表示模型的参数不确定性,由 $(a - a_0)x_1 + (b - b_0)u$, $L \frac{di(t)}{dt}$ 相关项以

及电磁力的高阶项构成; $\tilde{d}$ 表示外界未知扰动,如风力或人为触碰造成的扰动。

因此,有必要设计一种对不确定性和外界扰动具有良好鲁棒性的控制器。

针对滑模控制中存在的抖振现象和稳态误差,本文的控制目标如下。

(1) 使钢球能够在平衡点附近位置保持稳定,

在控制过程中要有效抑制磁悬浮球的抖振现象,减小稳态误差;

(2) 当系统控制输入受到外界扰动时,小球位移轨迹能够受到较小的影响,并尽快恢复到设定值。

2 控制器设计

2.1 磁悬浮球系统的 ESO 设计

根据式(7)取扰动 $x_3 = f(x_1, x_2, u) + \tilde{d}$ 作为一个新的状态变量,并令 $\dot{x}_3 = h$, 假设 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_3 = 0$, 则系统的扩张状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + a_0 x_1 + b_0 u \\ \dot{x}_3 = h \end{cases} \quad (8)$$

定义观测器增益矩阵 $L = [\beta_1, \beta_2, \beta_3]^T$, 对这个系统建立状态观测器,得:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e_1 \\ \dot{z}_2 = z_3 + a_0 x_1 + b_0 u - \beta_2 e_1 \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 e_1 \end{cases} \quad (9)$$

其中, $z_1 = \hat{x}_1$, $z_2 = \hat{x}_2$, $z_3 = \hat{x}_3$, 定义观测器误差 $e_1 = z_1 - x_1$, $e_2 = z_2 - x_2$, $e_3 = z_3 - x_3$, 则有:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - \beta_1 e_1 \\ \dot{e}_2 = e_3 - \beta_2 e_1 \\ \dot{e}_3 = -h - \beta_3 e_1 \end{cases} \quad (10)$$

上式可以描述为

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 & 0 \\ -\beta_2 & 0 & 1 \\ -\beta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} e + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} h \quad (11)$$

其中, $e = [e_1, e_2, e_3]^T$ 。所以有

$$\det(\lambda I - A) = \lambda^3 + \beta_1 \lambda^2 + \beta_2 \lambda + \beta_3 \quad (12)$$

通过劳斯判据证明观测器的稳定性,只需设计观测器增益 $\beta_i > 0$ ($i = 1, 2, 3$), 且 $\beta_1 \beta_2 > \beta_3$, 并满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_3 = 0$, 所设计的观测器即是稳定的。

2.2 连续滑模控制器设计

本节考虑系统中存在的不确定性和未知外界扰动,讨论不对扰动进行补偿时连续滑模控制器的稳定性以及结合了 ESO 之后连续滑模控制器的稳定

性。

由于控制目标是使小球在平衡位置附近稳定悬浮,那么 $x_1 \neq 0$, 所以无法直接设计滑模函数,根据系统模型式(7)构建如下误差系统。

$$\begin{cases} \delta_1 = x_r - x_1 \\ \dot{\delta}_1 = \delta_2 = -x_2 \\ \dot{\delta}_2 = -\dot{x}_2 = -a_0 x_1 - b_0 u \end{cases} \quad (13)$$

其中, $x_3 = f(x_1, x_2, u) + \tilde{d}$ 为系统中存在的扰动, x_r 为常量,表示位移设定值。

设计滑模面函数为

$$s = c\delta_1 + \delta_2 \quad (14)$$

求得等效控制律为

$$u_{eq} = -\frac{1}{b_0}[cx_2 + a_0 x_1] \quad (15)$$

设计滑模趋近律为

$$\dot{s} = -k|s|^\alpha \text{sgn}(s) \quad (16)$$

联立式(14)和式(16),得到滑模控制律为

$$u_0 = -\frac{1}{b_0}[cx_2 + a_0 x_1 - k|s|^\alpha \text{sgn}(s)] \quad (17)$$

选取李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (18)$$

结合控制率式(17),对李雅普诺夫函数求1阶导数,得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} \\ &= s[-cx_2 - a_0 x_1 - b_0 u_0 - x_3] \\ &= -k|s|^{\alpha+1} - sx_3 \\ &\leq -k|s|^{\alpha+1} + |sx_3| \\ &= -k|s|^{\alpha+1} + |s||x_3| \\ &= -|s|[k|s|^\alpha - |x_3|] \end{aligned} \quad (19)$$

注1 上述控制器的设计没有考虑到不确定性和外界扰动的影响,而实际上:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= a_0 x_1 + b_0 u_0 + x_3 \\ &= a_0 x_1 + b_0(u_0 + \frac{x_3}{b_0}) \end{aligned} \quad (20)$$

扰动将对控制输入产生持续的影响,根据文献[22]

可知,滑模的最终界为 $|s| \leq (M/k)^\frac{1}{\alpha}$, 其中 $M \geq |f+d|$, 所以滑模面函数 s 不能到达0,系统中存在不可消除的稳态误差。根据式(9)得:

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 &= -\beta_2 e_1 + a_0 x_1 + b_0 u_0 + z_3 \\ &= -\beta_2 e_1 + a_0 x_1 + b_0(u_0 + \frac{1}{b_0}z_3) \end{aligned} \quad (21)$$

可将控制律设计为 $u = u_0 - \frac{z_3}{b_0}$ 以消除扰动。其中 b_0 是决定补偿强弱的“补偿因子”,作为可调参数使用。

接着,对结合了ESO的连续滑模控制器进行稳定性分析,将控制律设计为

$$\begin{aligned} u &= u_0 - \frac{z_3}{b_0} \\ &= -\frac{1}{b_0}[cx_2 + a_0 x_1 - k|s|^\alpha \text{sgn}(s) + z_3] \end{aligned} \quad (22)$$

其中, $k > 0, 0 < \alpha < 1$ 。

李雅普诺夫函数的1阶导数改变为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} \\ &= s[-cx_2 - a_0 x_1 - b_0(u_0 - \frac{z_3}{b_0}) - x_3] \\ &= -k|s|^{\alpha+1} + s[z_3 - x_3] \\ &= -k|s|^{\alpha+1} - se_3 \\ &\leq -k|s|^{\alpha+1} + |se_3| \\ &= -k|s|^{\alpha+1} + |s||e_3| \\ &= -|s|(k|s|^\alpha - |e_3|) \end{aligned} \quad (23)$$

其中, e_3 为2.1节中的观测器误差。滑模面函数 s 的值虽仍然不能到0,但在控制器式(22)的作用下,滑模的最终界为 $|s| \leq (\tilde{M}/k)^\frac{1}{\alpha}$, 其中 $\tilde{M} \geq |e_3|$, $\tilde{M} \ll M$, 所以系统中存在的稳态误差将会大大减小。系统在不确定性和外界扰动的影响下能够渐近稳定,所提控制器比连续滑模控制器具有更好的抗干扰性能。

注2 控制器式(17)和式(22)中虽然有符号函数的存在,但由于有幂次项,因此它们都是连续滑模控制器。

3 控制仿真及实验验证

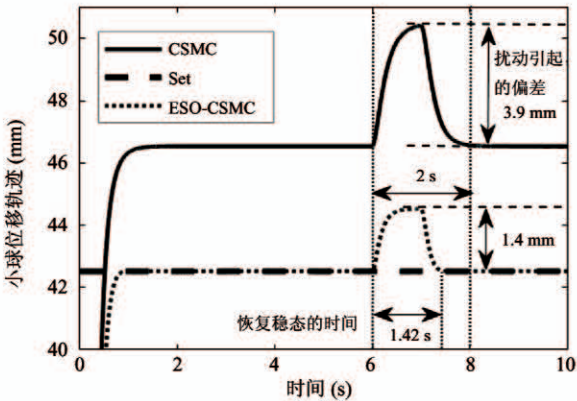
3.1 磁悬浮球系统的滑模控制仿真

综合前述控制器,利用Simulink仿真软件对磁悬浮球控制系统进行仿真。为了模拟存在参数不确

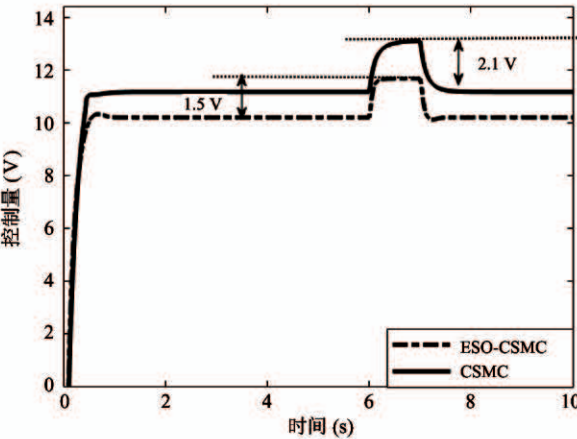
定性的磁悬浮球系统,改变系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{-0.25}{s^2 - 60} \tag{24}$$

设定磁悬浮球的悬浮位置为 $x_r = 42.5\text{ mm}$, 为了模拟系统受到外界扰动的干扰,在 $6 \sim 7\text{ s}$ 内给控制量加入 1 V 大小的方波扰动,图 2 为仿真结果。其中,CSMC 表示连续滑模控制方法,ESO-CSMC 表示结合了 ESO 的连续滑模控制方法。参数选择为 CSMC: $c = 16, k = 4, \alpha = 0.75$; ESO-CSMC: $c = 16, k = 4, \alpha = 0.75, \beta_1 = 1\,000, \beta_2 = 330\,000, \beta_3 = 31\,250\,000, b_0 = -0.3$, 其中 b_0 为控制输入增益。



(a) 小球的位移轨迹



(b) 系统控制量曲线

图 2 磁悬浮球滑模控制仿真曲线

从图 2 可知,当存在模型不确定性时,CSMC 能使系统到达稳定状态,但位移轨迹与设定值之间存在 3.03 mm 的稳态误差,这与 2.2 小节注 1 的结论一致。当给系统增加外界扰动时,系统的位移变化

量和控制输入变化量分别为 3.9 mm 和 2.1 V ,扰动消失后,系统状态经过 1 s 恢复到稳态值。而结合 ESO 对系统扰动进行补偿后,系统位移能够很好地跟踪设定轨迹,给系统增加外界持续扰动时,系统的位移变化量和控制输入变化量分别为 1.4 mm 和 1.5 V ,扰动消失后,系统状态只经过 0.42 s 就恢复到了稳态值,抑制了扰动给系统带来的影响。

3.2 磁悬浮球系统的滑模控制实验验证

为了验证所提出的 ESO-CSMC 控制方法的干扰抑制能力,将其与 CSMC 控制方法进行比较。参数选择为 CSMC: $c = 18, k = 4, \alpha = 0.75$; ESO-CSMC: $c = 18, k = 4, \alpha = 0.75; \beta_1 = 1\,000, \beta_2 = 330\,000, \beta_3 = 31\,250\,000, b_0 = -0.28$ 。本文所采用的磁悬浮球系统实验平台如图 3 所示。

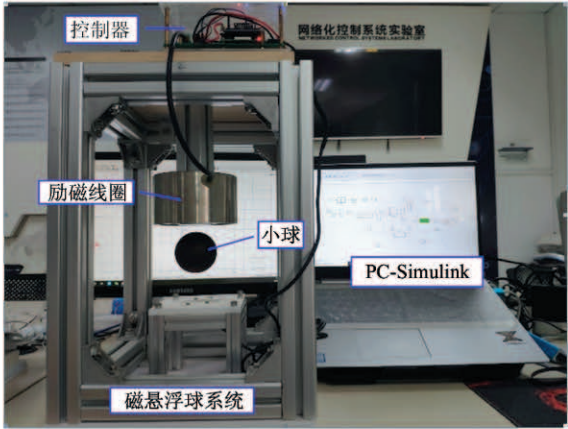


图 3 磁悬浮球系统实验平台

在 $6 \sim 7\text{ s}$ 内给控制量加入 0.4 V 大小的方波扰动,磁悬浮球的位移轨迹如图 4 所示。

由图 4 可知,采用 CSMC 时,系统位移状态会出现较大的稳态误差,小球的抖振现象也更加严重,而对系统扰动进行补偿后,稳态误差基本消除,抖振幅度也减小了很多,由外界扰动引起的位移轨迹偏移量和控制输入变化量也减小了很多,因此系统的鲁棒性也得到增强。当外界持续扰动消失后,系统能够更快复到稳定状态,证明系统具有了更强的稳定性。实验结果与仿真结果一致。具体的控制性能指标见表 2。

其中, $e_{\max}$ 表示扰动引起的最大位置偏移量, t_c 代表收敛到稳态的时间。

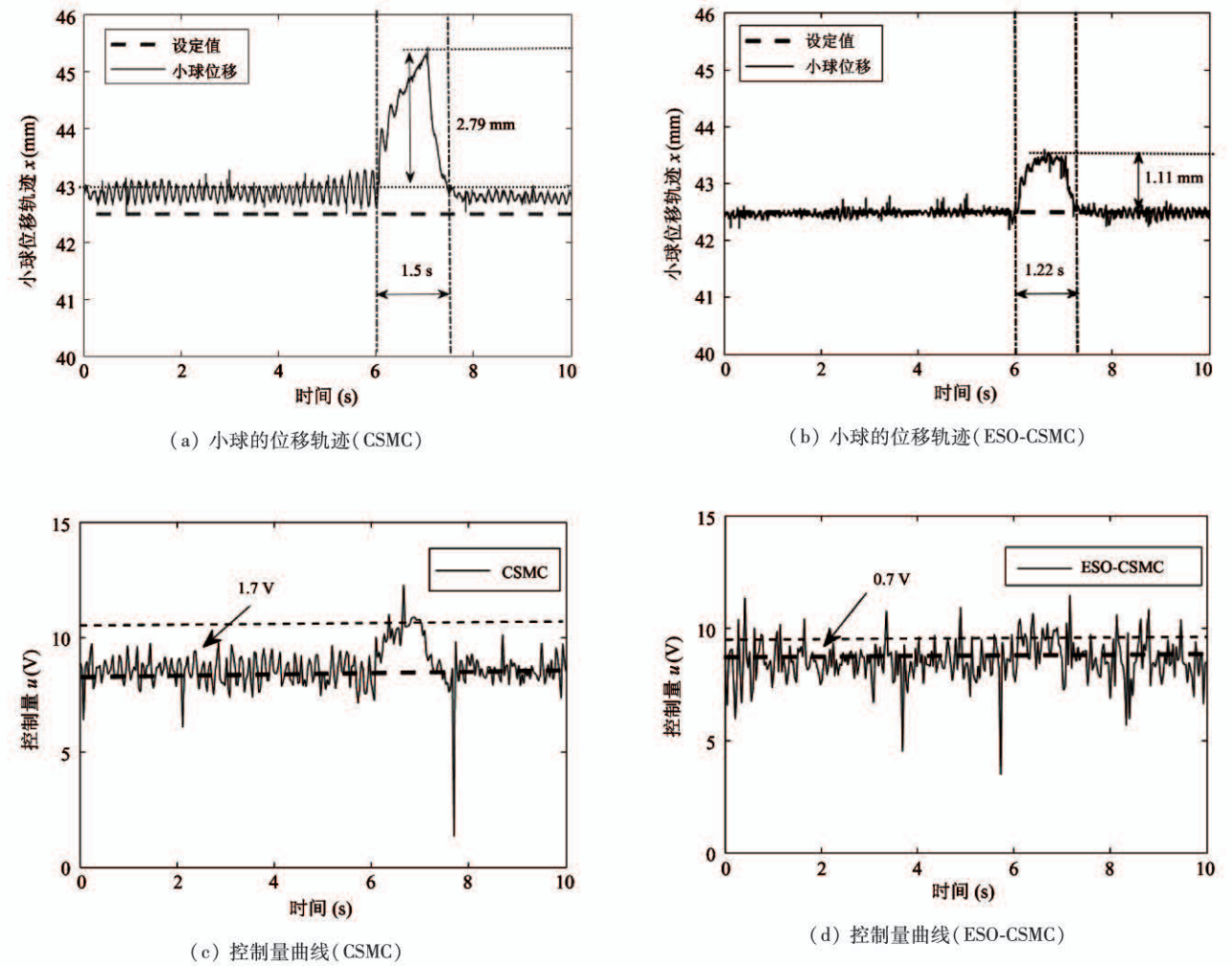


图4 磁悬浮球滑模控制实验验证

表2 控制性能指标参数表(实验验证)				
控制方法	稳态值	稳态误差	$e_{\max}$	t_c
CSMC	42.71 mm	0.22 mm	2.79 mm	0.5 s
ESO-CSMC	42.49 mm	0.01 mm	1.11 mm	0.22 s

综上所述,对比连续滑模控制方法,本文方法在抑制系统抖振现象、减小稳态误差和抑制扰动方面具有更加优良的性能。

4 结 论

本文针对磁悬浮球系统具有模型不确定性和易受外界扰动影响的特点,设计了一种基于 ESO 的连续滑模控制器,通过 ESO 将系统中的扰动估计出来,并用作连续滑模控制器的补偿量,抑制了抖振现象,减小了系统的稳态误差,提升了系统的抗干扰性

能,而且控制器设计较为简单,可以较为容易地推广到实际应用中。

参考文献

[1] Lee H, Kim K, Lee J. Review of maglev train technologies [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42 (7): 1917-1925

[2] 郭垒磊,李悦,于溯源. 主动磁悬浮轴承支撑旋转机械的减振性能研究 [J]. *高技术通讯*, 2013, 23 (6): 617-622

[3] Ding H F, Zhu H Q, Hua Y Z. Optimization design of bearingless synchronous reluctance motor [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28 (3): 1-5

[4] Rohacs D, Rohacs J. Magnetic levitation assisted aircraft take-off and landing (feasibility study-GABRIEL concept) [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2016, 85: 33-50

[5] 李广. 磁悬浮球系统的鲁棒控制研究 [D]. 哈尔滨:

- 哈尔滨工程大学自动化学院, 2013: 1-2
- [6] Singh B, Kumar A. Stabilization and control of magnetic levitation system using 2-degree-of-freedom PID controller [J]. *Recent Trends in Communication, Computing, and Electronics*, 2018, 7: 569-579
- [7] Ghosh A, Krishnan T R, Tejaswy P, et al. Design and implementation of a 2-DOF PID compensation for magnetic levitation systems [J]. *ISA Transactions*, 2014, 53 (4): 1216-1222
- [8] Singrul N, Ginoya D, Shendge P, et al. A state-feedback control approach via inertial delay observer for magnetic levitation system [C] // 2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC), Pune, India, 2015: 1670-1674
- [9] Nath A, Samantaray J, Chaudhury S, et al. Magnetic ball levitation system control using sliding mode control and fuzzy PD + I control: a comparative study [C] // International Conference on Energy, Power and Environment (Towards Sustainable Growth) ICEPE 2015, Shillong, India, 2015: 1-5
- [10] Yang Z J, Tateishi M. Adaptive robust nonlinear control of a magnetic levitation system [J]. *Automatica*, 2001, 37: 1124-1131
- [11] Shiakolas P S, Schenck S R V, Piyabongkarn D, et al. Magnetic levitation hardware-in-the-loop and Matlab-based experiments for reinforcement of neural network control concepts [J]. *IEEE Transactions on Education*, 2004, 47(1): 33-41
- [12] 曹广忠, 潘建飞, 黄苏丹, 等. 磁悬浮控制系统算法及实现 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 150-151
- [13] Fallaha C, Kanaan H, Saad M. Real time implementation of a sliding mode regulator for current-controlled magnetic levitation system [C] // In Mediterranean Conference on Control and Automation, Limassol, Cyprus, 2005: 696-701
- [14] Cho D, Kato Y, Spilman D. Sliding mode and classical controllers in magnetic levitation systems [J]. *IEEE Control Systems*, 1993, 13(1): 42-48
- [15] Al-Muthairi N, Zribi M. Sliding mode control of a magnetic levitation system [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2004, 2: 93-107
- [16] Shao X J, Meng F B, Chen Z M, et al. The exponential reaching law sliding mode control of magnetic levitation system [C] // 28th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Yinchun, China, 2016: 3500-3503
- [17] 邹立颖, 李惠光, 李国友. 基于非线性干扰观测器的 VTOL 飞行器跟踪控制 [J]. 高技术通讯, 2015, 25 (22): 935-940
- [18] 白国振, 邱磊, 周媛, 等. 气动加载系统的粒子群-滑模观测器控制 [J]. 控制工程, 2017, 24(11): 2324-2331
- [19] 魏新江, 张林青. 一类随机系统基于干扰观测器的抗干扰控制 [J]. 控制与决策, 2017, 32(5): 939-942
- [20] 张春雨, 姜长生, 朱亮. 基于模糊干扰观测器的轨迹线性化控制研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29 (6): 920-925
- [21] 张鋆豪, 张文安. 磁悬浮球系统的线性自抗扰控制与参数整定 [J]. 系统科学与数学, 2017, 37(8): 1741-1756
- [22] 李鹏, 马建军, 郑志强. 采用幂次趋近律的滑模控制稳态误差界 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(5): 619-624

Continuous sliding mode control of magnetic levitation ball based on extended state observer

Zhao Lei, Wang Junxiao, Huang Guangpu, Xu Binbin, Yu Li

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

Aiming at the nonlinearity, model uncertainty and susceptibility to interference of the magnetic levitation ball system, a continuous sliding mode control (CSMC) method based on extended state observer (ESO) is proposed (ESO-CSMC). The control method uses ESO to observe and estimate the disturbance of the system, and then uses the disturbance estimation value as the compensation amount of the continuous sliding mode controller to overcome the influence of uncertainty and external disturbance, further improving the control performance of continuous sliding mode controller. Simulations and experiments verify the effectiveness of the proposed method. The results show that compared with the continuous sliding mode control method (CSMC), the ESO-CSMC has stronger anti-interference performance.

Key words: magnetic levitation ball system, continuous sliding mode control (CSMC), extended state observer (ESO), anti-interference performance