

基于RBF神经网络的磁悬浮时滞系统 Backstepping控制与仿真

邢丹

北方工业大学理学院, 北京

收稿日期: 2024年6月9日; 录用日期: 2024年7月2日; 发布日期: 2024年7月10日

摘要

磁悬浮系统能使铁磁性物体悬浮在空中, 可以应用于科研、医疗、娱乐、交通等多个领域。为了解决非线性、不稳定磁悬浮系统的控制问题, 建立了磁悬浮时滞系统的数学模型, 采用了Backstepping控制以及RBF神经网络和Backstepping控制结合的方法进行研究, 采用李雅普诺夫稳定性理论分别设计非线性控制器, 保证闭环系统的理论稳定。在此基础上, 利用Radial basis function (RBF)神经网络的逼近特性, 设计了自适应律, 研究了对系统中未知函数的拟合。最后, 通过MATLAB对两种控制方法的效果进行对比, 仿真结果表明, 两种方法均能使系统稳定, RBF神经网络与Backstepping控制结合的方法能较快实现稳定, 效果更好, 且RBF神经网络对未知函数的拟合效果也良好。

关键词

磁悬浮时滞系统, RBF神经网络, Backstepping

Backstepping Control and Simulation of Magnetic Suspension Time Delay System Based on RBF Neural Network

Dan Xing

College of Science, North China University of Technology, Beijing

Received: Jun. 9th, 2024; accepted: Jul. 2nd, 2024; published: Jul. 10th, 2024

Abstract

The magnetic levitation system can levitate ferromagnetic objects in the air, which can be used in

scientific research, medical treatment, entertainment, transportation and other fields. In order to solve the control problem of nonlinear and unstable maglev system, a mathematical model of the maglev delay system is established, the backstepping control and the combination of RBF neural network and Backstepping control are used to study, and the nonlinear controller is designed by using the Lyapunov stability theory to ensure the theoretical stability of the closed-loop system. On this basis, the adaptive law is designed by using the approximation characteristics of the Radial basis function (RBF) neural network, and the fitting of the unknown functions in the system is studied. Finally, the results of the two control methods are compared by MATLAB, and the simulation results show that the two methods can make the system stable, and the combination of RBF neural network and Backstepping control can achieve stability quickly and better, and the RBF neural network has a good fitting effect on the unknown function.

Keywords

Magnetic Levitation Time-Delay System, RBF Neural Network, Backstepping

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

磁悬浮系统是一种使物体在没有磁场以外的任何物理支撑的情况下悬浮在空中的方法，因其具有噪音低、能耗低、无接触等诸多优点，被应用到各个行业当中。我国磁悬浮领域的“凿岩者”李永胜，曾带领团队研发出了各种磁悬浮系统相关的节能装备，突破一系列“卡脖子”技术，使我国在磁悬浮技术应用方面实现了从“跟跑”“并跑”到部分“领跑”的转变，进入了世界先进行列，这也是我国实现“双碳”目标重要的技术支撑。磁悬浮技术可以应用于 3D 细胞培养，这种方法不需要制造支架和其他结构，也不需要再培养过程中使用特定的血清培养基，是一种非常有效的 3D 细胞培养技术[1]。磁悬浮技术还可以用于分离大量混合聚合物，将样品浸入具有顺磁性的介质中，利用磁性进行分离。此外，还有磁悬浮洗衣机，相比传统的洗衣机，由于磁悬浮无接触的特性，利用磁力，使得洗衣噪音大大降低[2]。

磁悬浮系统的控制问题一直是控制系统领域的研究热点，受到不少研究者的广泛关注。Wang Z 等人针对永磁电磁铁悬挂技术(PEMS)高速磁悬浮列车系统提出了基于反馈线性化理论的解耦控制器。仿真和实验表明，该解耦控制器具有良好的解耦效果，通过仿真验证了反馈线性化方法的有效性[3]。Karahan M 等人设计了鲁棒反步控制器对四旋翼无人机非线性模型进行高度和姿态控制，将经典比例积分导数控制器(PID)的效果以及反步控制器的性能进行对比，发现反步控制器在高度角和姿态角度控制方面取得了较好的效果[4]。Singh B K 比较了反步控制以及 PID 控制两种方法对磁悬浮系统的控制效果，发现反步控制器的平衡范围更大，效果更好[5]。Sun Y 等人利用 Takagi-Sugeno (T-S)模糊技术将时滞磁悬浮系统(MLS)的非线性动态模型转化为 T-S 模糊模型，利用并行分布补偿方法和 H_∞ 方法设计全局的鲁棒控制器，且在设计控制器部分考虑时滞，解决系统中时间延迟的问题，仿真表明，所提出的控制器具有更快的响应速度和更好的悬浮稳定性静态误差[6]。Sun Y 等研究了磁悬浮系统的输入时滞问题，提出了一种基于强化学习的滑膜控制器，利用补偿器消除输入延迟，设计可以使系统稳定的控制器，结果表明，控制器能有效抑制不确定特性的振动问题[7]。Bouaiss O 等提出了一种用于四旋翼鲁棒轨迹跟踪的嵌套控制策略，该策略使用自适应 RBF 补偿和嵌入积分反步(IFS)的神经网络监督控制。该方法解决了在存在建模不确定

性、感知噪声和有界干扰的情况下的鲁棒性问题。仿真结果表明,与PID、IBS和离线分散多层感知器(MLP)算法相比,该算法对模型参数的变化具有很强的适应性,在参数收敛、干扰补偿控制和噪声衰减方面具有优越的性能[8]。Shou B等研究了磁悬浮列车的稳定性,研究发现基于强化学习的PID控制器具有更好的稳定性,且比传统PID方法控制系统的所需时间少[9]。Sebastian J等发现使用RBF神经网络对所研究的二阶非放射性非线性磁悬浮系统设计的控制器能够比基于Sigmoid激活函数的神经网络设计的控制器更好的实现控制目标,相比之下,RBF神经网络逼近未知非线性函数的效果更佳,RBF神经网络还具有简单、快速等优点,且比传统的神经网络具有更好的泛化能力[10]。

磁悬浮在各领域都具有广阔的应用前景,但是由于磁悬浮系统具有滞后性以及高速不稳定的特性,使得研究系统的稳定性以及控制精度对系统的性能更为重要。因此,需要一个控制器对系统进行稳定和控制,所以,我们非常有必要研究磁悬浮系统的控制,以便实现更加高效、可行的应用。

本文针对磁悬浮系统进行了研究,主要是考虑系统中电阻部分时滞存在的情况下,使用单一的Backstepping控制以及基于RBF神经网络的Backstepping控制方法设计系统的控制器,使系统达到理论稳定,并且使用Simulink进行仿真,观察结果并进行分析。

2. 磁悬浮时滞系统模型

2.1. 电气子系统模型

电气子系统模型就是电磁线圈,见图1。本文中考虑电阻部分时滞的存在,因此以下模型中,电阻部分电流均用时滞表示。

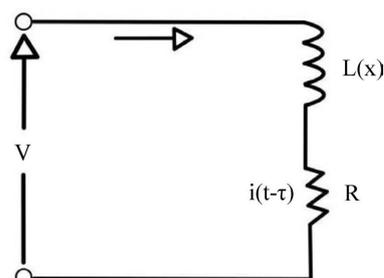


Figure 1. Electrical subsystem
图 1. 电气子系统

电流产生的电磁力由基尔霍夫电压定律给出:

$$V(t) = V_R + V_L = Ri(t-\tau) + \frac{d[L(x)i]}{dt} \quad (1)$$

其中,

V 表示输入电压,

i 表示电流,

R 表示电阻,

$L(x)$ 表示线圈电感。

$$L(x) = L + \frac{L_0 x_0}{x} \quad (2)$$

其中:

L 表示无球时的恒定电感,
 L_0 表示有球时的恒定电感,
 x_0 表示平衡位置,
 x 表示小球位置。

2.2. 机械子系统模型

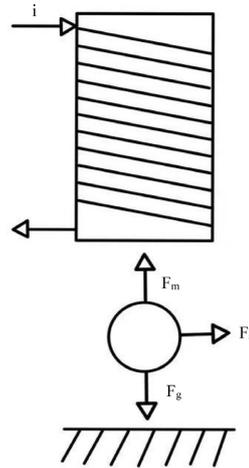


Figure 2. Mechanical subsystem
 图 2. 机械子系统

根据牛顿第二定律, 忽略粘性摩擦力, 见图 2, 磁悬浮系统模型方程为[11]:

$$F_a = F_g - F_m \quad (3)$$

$$m\ddot{x} = mg - k \frac{i^2}{x^2} \quad (4)$$

其中,

m 表示小球质量,
 g 表示重力常数,
 k 表示磁力常数。

2.3. 数学模型

将磁悬浮系统的非线性模型用以下方程描述:

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (5)$$

$$V(t) = Ri(t - \tau) + \frac{d[L(x)i]}{dt} \quad (6)$$

将(2)式代入(6)式, 令 $L_0 x_0 = 2k$, 则有:

$$V(t) = Ri(t - \tau) + L \frac{di}{dt} - \frac{2kix}{x^2} \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

将(5)式代入(4)和(7)式, 经整理可得:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v \\ \frac{dv}{dt} = g - \frac{ki^2}{mx^2} \\ \frac{di}{dt} = -\frac{Ri(t-\tau)}{L} + \frac{2kiv}{Lx^2} + \frac{V}{L} \end{cases} \quad (8)$$

其中, v 表示速度。

3. Backstepping 控制器设计

Backstepping 控制的核心思想是反向迭代, 又称反步法, 通过为非线性子系统设计 Lyapunov 函数以及虚拟控制量, 使每个子系统达到理论稳定, 进而完成整个系统的控制器设计。控制目标是使系统稳定以及输出 x 跟踪到期望的轨迹 x_1 , 所有信号均处于有界的范围内。

定义误差 $z_1 = x - x_1$, x_1 为指定位置, 则: $\dot{z}_1 = \dot{x} - \dot{x}_1 = v - \dot{x}_1$

定义 Lyapunov 函数 V_1 :

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (9)$$

则: $\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1 (v - \dot{x}_1)$

取 $v = \dot{x}_1 - c_1 z_1 + z_2$, 其中 $c_1 > 0$, z_2 为虚拟控制量, 即 $z_2 = v + c_1 z_1 - \dot{x}_1$, 则

$\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2$ 。

若 $z_2 = 0$, 则 $\dot{V}_1 \leq 0$ 。

定义 Lyapunov 函数 V_2 :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (10)$$

由于 $\dot{z}_2 = \dot{v} + c_1 \dot{z}_1 - \ddot{x}_1$, 则:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \left(g - \frac{ki^2}{mx^2} + c_1 \dot{z}_1 - \ddot{x}_1 \right) \quad (11)$$

取 $-\frac{ki^2}{mx^2} = -c_1 \dot{z}_1 + \ddot{x}_1 - g + z_3 - z_1 - c_2 z_2$, 其中 $c_1 > 0$, z_3 为虚拟控制量, 即

$z_3 = g - \frac{ki^2}{mx^2} + c_1 \dot{z}_1 - \ddot{x}_1 + z_1 + c_2 z_2$, 则

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + z_2 z_3$$

若 $z_3 = 0$, 则 $\dot{V}_2 \leq 0$ 。

定义 Lyapunov 函数 V_3 :

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} z_3^2 + \int_{t-\tau}^t H(\phi) d\phi \quad (12)$$

其中, $H(\phi) = \frac{R^2}{2L^2} z_3^2(\phi) i^2(\phi)$ 。

要使 $\dot{V}_3 \leq 0$, 则控制器应为:

$$V_{ul} = \left(\frac{-\frac{mT_1x^4}{k} + 2x\dot{x}i^2}{2ix^2} - \frac{2kiv}{Lx^2} \right) L \tag{13}$$

其中, $T_1 = -\frac{2k^2i^2z_3}{m^2x^4} - \frac{R^2i^2z_3}{2L^2} - c_1\ddot{z}_1 - \dot{z}_1 - c_2\dot{z}_2 - z_2 - c_3z_3 + \ddot{x}_1$, $c_3 > 0$, 则:

$$\dot{V}_3 = -c_1z_1^2 - c_2z_2^2 - c_3z_3^2 \leq 0$$

证明:

文献[12]中, 系统满足下列假设时, 存在一个状态反馈控制律使系统稳定。

即: 1) $|h_j(w_i(t-\tau))| \leq \sigma_i(w_i(t-\tau))$, $\sigma_i(w_i(t-\tau))$ 是已知光滑非线性函数且 $\sigma_i(0) = 0$;

2) $g_i(\omega_i) \neq 0$ 。

本文假设文中磁悬浮系统同样满足该条件时, 存在一个状态反馈控制律使得闭环系统渐进稳定, 即

$$\left| -\frac{Ri(t-\tau)}{L} \right| \leq -\frac{Ri(t-\tau)z_3(t-\tau)}{L}$$

由于 $\dot{z}_3 = -\frac{k}{m} \left(\frac{2iix^2 - 2x\dot{x}i^2}{x^4} \right) + c_1\ddot{z}_1 - \ddot{x}_{1d} + \dot{z}_1 + c_2\dot{z}_2$

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= \dot{V}_2 + z_3\dot{z}_3 + H(t) - H(t-\tau) \\ &= z_3 \left\langle -\frac{k}{m} \left[\frac{2i \left[-\frac{Ri(t-\tau)}{L} + \frac{2kiv}{Lx^2} + \frac{V}{L} \right] x^2 - 2x\dot{x}i^2}{x^4} \right] + c_1\ddot{z}_1 - \ddot{x}_{1d} + \dot{z}_1 + c_2\dot{z}_2 \right\rangle \\ &\quad - c_1z_1^2 - c_2z_2^2 + z_2z_3 + H(t) - H(t-\tau) \\ &= z_3 \left\langle -\frac{k \left[2i \left(\frac{2kiv}{Lx^2} + \frac{V}{L} \right) x^2 - 2x\dot{x}i^2 \right]}{mx^4} + \frac{2kiRi(t-\tau)}{Lmx^2} + c_1\ddot{z}_1 - \ddot{x}_1 + \dot{z}_1 + c_2\dot{z}_2 \right\rangle \\ &\quad - c_1z_1^2 - c_2z_2^2 + z_2z_3 + H(t) - H(t-\tau) \\ &= z_3 \left\langle -\frac{k \left\{ 2i \left[\frac{2kiv}{Lx^2} + \frac{V}{L} \right] x^2 - 2x\dot{x}i^2 \right\}}{mx^4} + c_1\ddot{z}_1 - \ddot{x}_1 + \dot{z}_1 + c_2\dot{z}_2 \right\rangle + \frac{2z_3kiRi(t-\tau)}{mx^2L} \\ &\quad - c_1z_1^2 - c_2z_2^2 + z_2z_3 + H(t) - H(t-\tau) \\ &\leq z_3 \left\langle -\frac{k \left[2i \left(\frac{2kiv}{Lx^2} + \frac{V}{L} \right) x^2 - 2x\dot{x}i^2 \right]}{mx^4} + c_1\ddot{z}_1 - \ddot{x}_1 + \dot{z}_1 + c_2\dot{z}_2 \right\rangle + \frac{2z_3^2k^2i^2}{m^2x^4} \\ &\quad + \frac{R^2i^2(t-\tau)}{2L^2} - c_1z_1^2 - c_2z_2^2 + z_2z_3 + H(t) - H(t-\tau) \end{aligned}$$

$$\leq z_3 \left\{ \frac{k \left[2i \left(\frac{2kiv}{Lx^2} + \frac{V}{L} \right) x^2 - 2x\dot{x}i^2 \right]}{mx^4} + c_1 \ddot{z}_1 - \ddot{x}_1 + \dot{z}_1 + c_2 \dot{z}_2 \right\} + \frac{2z_3^2 k^2 i^2}{m^2 x^4} \quad (14)$$

$$+ \frac{R^2 i^2 (t-\tau) z_3^2 (t-\tau)}{2L^2} - c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + z_2 z_3 + H(t) - H(t-\tau)$$

若将控制器代入上述式子, 可得 $\dot{V}_3 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 \leq 0$ 。

经分析可得指数收敛形式: $V_3(t) \leq V_3(0)e^{-\lambda t}$, 其中 $\lambda = 2 \max(c_1, c_2, c_3)$ 。当 $t \rightarrow \infty$ 时, $z_1 \rightarrow 0$, $z_2 \rightarrow 0$ 和 $z_3 \rightarrow 0$, 且 $x \rightarrow x_1$ 。因此, 使用 Backstepping 控制方法可以实现指数收敛, 从而使系统达到稳定状态。

考虑到系统中电阻部分存在时滞导致控制器的设计相对复杂, 因此考虑到使用 RBF 神经网络拟合的方法研究系统控制器, 将 $-\frac{Ri(t-\tau)}{L}$ 设为未知函数 $f(x^*)$, 对未知函数进行逼近拟合。

4. 基于 RBF 的 Backstepping 控制器设计

4.1. 神经网络理论

Radial basis function (RBF)神经网络是一种三层前馈神经网络, 因其网络结构复杂度低, 且泛化能力比较好等特性, 使其在函数逼近、模式分类、机器学习、数据挖掘等方面被广泛应用。主要是由输入层、隐含层、输出层三部分组成[13]。RBF 神经网络具有万能逼近性, 网络算法为:

$$\begin{cases} h_j = \exp\left(-\frac{\|x^* - c_j\|^2}{2b_j^2}\right) \\ f = W^{*T}h(x^*) + \varepsilon \end{cases} \quad (15)$$

其中, $x^* = [x_i]^T$ 为网络的输入, j 为隐含层的第 j 个节点, c_j 为高斯基函数中心点的坐标向量, 指的是高斯基函数对所研究系统中输入的敏感程度, b_j 为高斯基函数的宽度, 指的是网络对于输入的映射能力, h_j 指输出, W^* 指网络理想权值, ε 指逼近误差, $\varepsilon \leq \varepsilon_N$ 。

文中网络输入取 $x^* = [x \quad v \quad i]^T$, 则网络输出为:

$$\hat{f}(x^*) = \hat{W}^T h(x^*) \quad (16)$$

取 $\tilde{W} = \hat{W} - W^*$, 则:

$$f(x^*) - \hat{f}(x^*) = W^{*T}h(x^*) + \varepsilon - \hat{W}^T h(x^*) = -\tilde{W}^T h(x^*) + \varepsilon \quad (17)$$

4.2. 控制器设计

采用 RBF 神经网络逼近 f , 根据式(15)可得此时的控制律为:

$$V_{u2} = \left[\begin{array}{c} -\frac{mT_2 x^4}{k} + 2x\dot{x}i^2 \\ \frac{k}{2ix^2} - \hat{f}(x^*) - \frac{2kiv}{Lx^2} - \eta \operatorname{sgn}(z_3) \end{array} \right] L \quad (18)$$

其中, $T_2 = -c_1 \ddot{z}_1 - \dot{z}_1 - c_2 \dot{z}_2 - z_2 - c_3 z_3 - \ddot{x}_1$, $\eta = -\frac{\psi mx^2}{2ki}$, 本文中 $\psi = 0.1$ 。

证明:

设计 Lyapunov 函数 V_4 :

$$V_4 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2} z_3^2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{W}^T \tilde{W} \quad (19)$$

式中: $\gamma > 0$ 。

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 &= z_3 \left\langle -\frac{k}{m} \left\{ \frac{2i \left[f(x^*) - \hat{f}(x^*) - \eta \operatorname{sgn}(z_3) \right] x^2}{x^4} \right\} + T_2 + c_1 \ddot{z}_1 - \ddot{x}_{1d} + \dot{z}_1 + c_2 \dot{z}_2 \right\rangle \\ &\quad - c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + z_2 z_3 + \frac{1}{\gamma} \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} \\ &= -\frac{kz_3}{m} \left\{ \frac{2i \left[f(x^*) - \hat{f}(x^*) - \eta \operatorname{sgn}(z_3) \right] x^2}{x^4} \right\} - c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 + \frac{1}{\gamma} \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} \\ &= -\frac{kz_3}{m} \left\{ \frac{2i \left[-\tilde{W}^T h(x^*) + \varepsilon - \eta \operatorname{sgn}(z_3) \right] x^2}{x^4} \right\} - c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 + \frac{1}{\gamma} \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} \\ &= \tilde{W}^T \left[\frac{1}{\gamma} \dot{\tilde{W}} + \frac{2kz_3 i}{mx^2} h(x^*) \right] + \frac{-2kz_3 i}{mx^2} \left[\varepsilon - \eta \operatorname{sgn}(z_3) \right] - c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 \\ &= \tilde{W}^T \left[\frac{1}{\gamma} \dot{\tilde{W}} + \frac{2kz_3 i}{mx^2} h(x^*) \right] + \left[\frac{-2ki}{mx^2} z_3 \varepsilon - \frac{-2ki}{mx^2} \eta |z_3| \right] - c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 \end{aligned} \quad (20)$$

自适应律为:

$$\dot{\tilde{W}} = -\gamma \frac{2kz_3 i}{mx^2} h(x^*) \quad (21)$$

则 $\dot{V}_4 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 + (z_3 \varphi - \psi |z_3|)$ 。

其中 $\varphi = \varepsilon \frac{-2ki}{mx^2}$, $\psi = \frac{-2ki}{mx^2} \eta$ 。

取 $\psi \geq \varphi \geq 0$, 取 $\psi = 0.1$, 则 $\dot{V}_4 \leq -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 \leq 0$ 。

当且仅当 $z_1 = z_2 = z_3 = 0$ 时, $\dot{V}_4 = 0$, 即当 $\dot{V}_4 \equiv 0$ 时, $z_1 = z_2 = z_3 = 0$, 根据 LaSalle 不变性的原理, 闭环系统是渐进稳定的, 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, $z_1 \rightarrow 0$, $z_2 \rightarrow 0$ 且 $z_3 \rightarrow 0$, 从而 $x \rightarrow x_1$ 。

5. 仿真分析

为了验证本文所提方法的有效性, 本文通过 Simulink 进行了仿真实验, 主要使用到的模块有 Constant 模块、To Workspace 模块、S-Function 模块, 控制系统实验模型如图 3 所示。仿真步长设置为变步长, 周期设置为 15s。系统参数值分别为 $m = 0.5 \text{ kg}$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $k = 1$, $R = 0.5 \Omega$, $L = 0.5 \text{ H}$, 控制器参数 $c_1 = c_2 = c_3 = 1$, 指定位置 $x_1 = 2$, 时间延迟 $\tau = 2 \text{ s}$, 系统状态初始值为 $[x \ v \ i]^T = [1 \ 0 \ 2]^T$ 。

采用 RBF 神经网络对未知函数进行逼近时, 自适应律中 $\gamma = 3$, 神经网络的输入为 $[x \ v \ i]^T$, 网络结构选为 3-5-1, 网络初始权值均为 0.1, 参数分别为:

$$b_j = 3, \quad c_{ij} = \begin{bmatrix} -3 & -1.5 & 0 & 1.5 & 3 \\ -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 \\ -6 & -3 & 0 & 3 & 6 \end{bmatrix}。$$

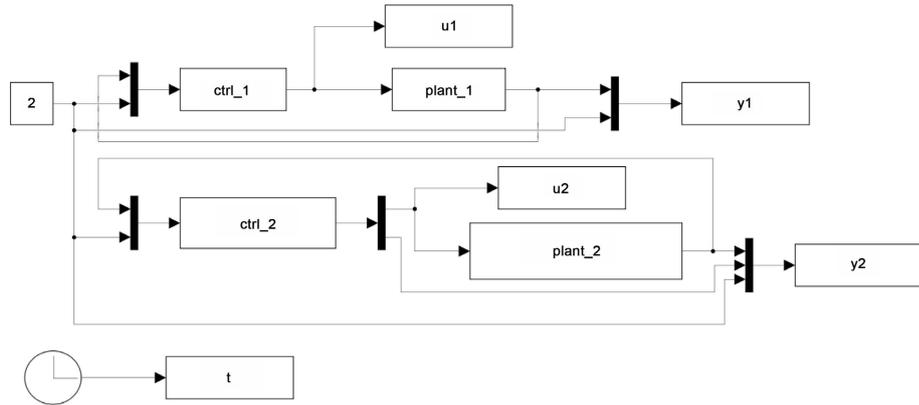


Figure 3. Simulink system block diagram
图 3. Simulink 系统框图

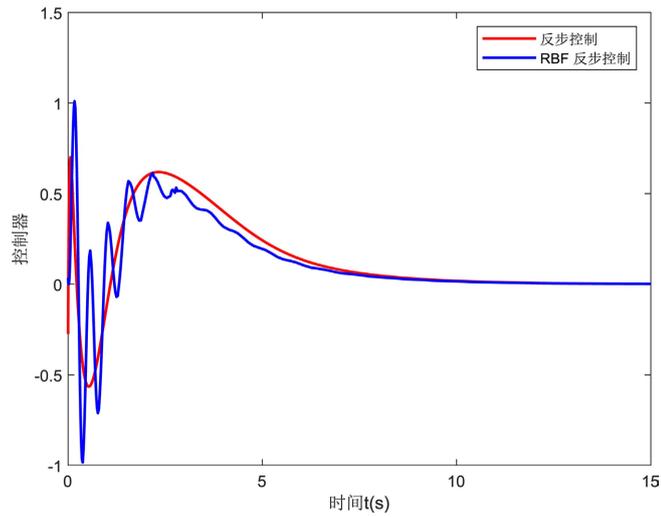


Figure 4. Controller variation curve
图 4. 控制器变化曲线

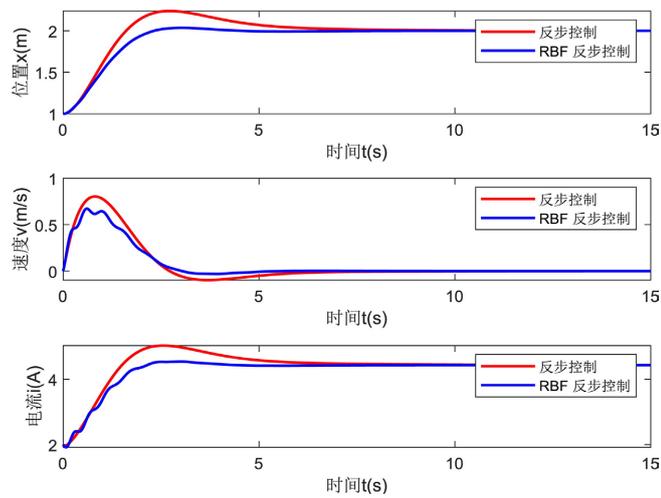


Figure 5. State change curve
图 5. 状态变化曲线

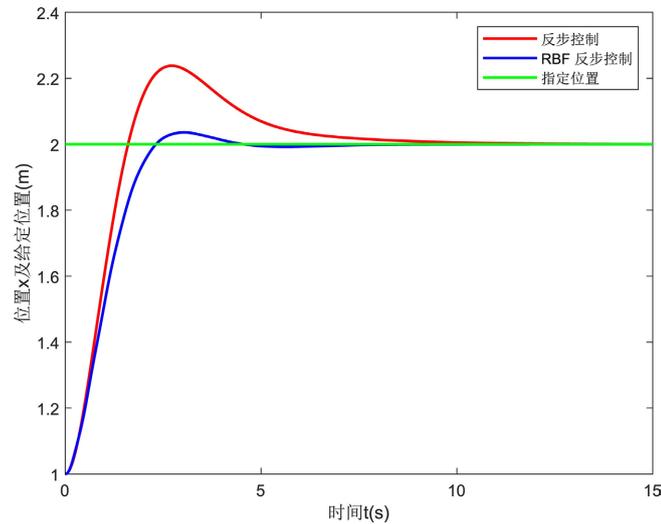


Figure 6. Position tracking change curve

图 6. 位置跟踪变化曲线

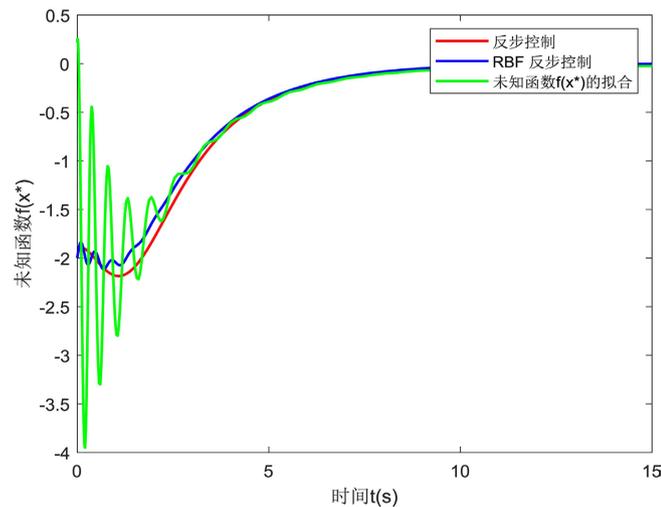


Figure 7. RBF fitting unknown function curve

图 7. RBF 拟合未知函数曲线

图 3 是 Simulink 系统仿真框架图，图 4~7 分别给出了仿真结果，图 4 是控制器变化曲线，图 5 展示了两种控制器作用下系统的状态变化曲线，可以看出在两种控制器的作用下，系统均能达到稳定状态，且使用基于 RBF 神经网络的控制器能够比单一控制器更快达到稳定，图 6 是两种控制器作用下输出 x 的位置跟踪图，可以看出输出 x 均可以较好地跟踪到指定位置，并且可以直观看出在基于 RBF 神经网络的控制器的作用下效果更好，波动范围更小，图 5 和图 6 均可以体现出 RBF 神经网络的优势所在。图 7 展示了两种控制方法下未知函数 $f(x^*)$ 的曲线图以及 RBF 神经网络对于未知函数的拟合图，可以看出 RBF 拟合效果良好。

6. 讨论

本文介绍了系统模型的构造，并使用两种控制方法研究了磁悬浮时滞系统，一种是采用 Backstepping 控制研究系统稳定，通过设计控制器使系统达到理论稳定，另一种是使用基于 RBF 神经网络的理论研究

系统的稳定以及研究未知函数的拟合，同样也设计了相关控制器使系统达到理论稳定，并且在使系统达到稳定的基础之上，研究了对于模型中小球位置的跟踪控制。在研究过程中，发现由于时滞项的存在，导致系统使用单一反步控制设计控制器时需要引入定积分项，用于抵消时滞项，而使用 RBF 神经网络对未知函数进行拟合，则简化了设计控制器的过程，这也从理论方面说明了 RBF 神经网络的优势所在。最终展示了两种方法下的仿真效果图，可以发现基于 RBF 神经网络的控制效果均比单一反步控制效果好，并且通过仿真图也可以看出，RBF 神经网络拟合效果也良好。

参考文献

- [1] Sarabi, M.R., Yetisen, A.K. and Tasoglu, S. (2022) Magnetic Levitation for Space Exploration. *Trends in Biotechnology*, **40**, 915-917. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2022.03.010>
- [2] Vibin, R., Govardhan, M.A. and Raffik, R. (2023) Magnetic Levitation Based Industrial Material Handling Systems: A Futuristic Review. *2023 2nd International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)*, Coimbatore, 16-17 June 2023, 1-6.
- [3] Wang, Z., Huang, C., Long, Z. and Li, X. (2018). Decoupling Levitation Control of PEMS High Speed Maglev Train Based on Feedback Linearization. *2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, Changsha, 4-8 July 2018, 1008-1013. <https://doi.org/10.1109/wcica.2018.8630541>
- [4] Karahan, M. and Kasnakoglu, C. (2022). Nonlinear Modeling and Robust Backstepping Control of a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle. *2022 5th International Conference of Computer and Informatics Engineering (IC2IE)*, Jakarta, 13-14 September 2022, 94-99. <https://doi.org/10.1109/ic2ie56416.2022.9970136>
- [5] Singh, B.K. and Kumar, A. (2018). Backstepping Approach Based Controller Design for Magnetic Levitation System. *2018 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, Gorakhpur, 2-4 November 2018, 1-6. <https://doi.org/10.1109/upcon.2018.8596885>
- [6] Sun, Y., Wang, S., Lu, Y., Xu, J. and Xie, S. (2022) Control of Time Delay in Magnetic Levitation Systems. *IEEE Magnetics Letters*, **13**, 1-5. <https://doi.org/10.1109/lmag.2021.3123909>
- [7] Sun, Y., Xu, J., Chen, C. and Hu, W. (2022) Reinforcement Learning-Based Optimal Tracking Control for Levitation System of Maglev Vehicle with Input Time Delay. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **71**, 1-13. <https://doi.org/10.1109/tim.2022.3142059>
- [8] Bouaiss, O., Mechgoug, R., Taleb-Ahmed, A. and Brikel, A.E. (2024) Robust Trajectory Tracking of Quadrotors Using Adaptive Radial Basis Function Network Compensation Control. *Journal of the Franklin Institute*, **361**, 1167-1185. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2023.12.045>
- [9] Shou, B., Zhang, H., Long, Z., Xie, Y., Zhang, K. and Gu, Q. (2023). Design and Applications of Q-Learning Adaptive PID Algorithm for Maglev Train Levitation Control System. *2023 35th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Yichang, 20-22 May 2023, 1947-1953. <https://doi.org/10.1109/ccdc58219.2023.10326815>
- [10] Sebastian, J. and V., S.K. (2023). Direct Adaptive Control of Nonaffine Magnetic Levitation System Using Radial Basis Function Neural Network. *2023 International Conference on Emerging Techniques in Computational Intelligence (ICETCI)*, Hyderabad, 21-23 September 2023, 303-308. <https://doi.org/10.1109/icetci58599.2023.10331257>
- [11] Khan, M.J., Junaid, M., Bilal, S., Siddiqi, S.J. and Khan, H.A. (2018). Modelling, Simulation & Control of Non-Linear Magnetic Levitation System. *2018 IEEE 21st International Multi-Topic Conference (INMIC)*, Karachi, 1-2 November 2018, 1-5. <https://doi.org/10.1109/inmic.2018.8595598>
- [12] 王刻奇, 杨智, 杨德根. 一类非线性时滞系统的 Backstepping 控制[J]. *控制工程*, 2017, 24(11): 2332-2336.
- [13] 刘金琨. RBF 神经网络自适应控制及 MATLAB 仿真[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2019.