



基于SMS-RBF-PID二自由度 悬浮系统控制算法研究

张欣超¹, 郝紫洋², 王美琪², 闫一凡³, 刘鹏飞², 王瑞晨²

(1. 中车信息技术有限公司, 北京 100084;

2. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043;

3. 中车工业研究院有限公司, 北京 100070)

摘要: 为提升二自由度悬浮系统在复杂扰动下的悬浮稳定性, 文章设计了一种滑模面驱动的径向基神经网络补偿PID控制器(sliding mode surface driven radial basis function neural network compensated proportional-integral-derivative controller, SMS-RBF-PID)。首先, 构建基于滑模面驱动的改进径向基神经网络补偿器, 输出补偿电流, 该补偿器通过滑模面对外部干扰进行在线学习, 并在神经网络中采用Adam优化器进行权重更新, 从而提升控制器对外部干扰的补偿能力; 然后, 将PID输出与补偿电流进行结合, 得到电磁铁电流控制律, 形成SMS-RBF-PID控制器; 最后, 仿真结果表明, SMS-RBF补偿器有效弥补了传统PID抗干扰能力弱的缺陷, 文章所提出的控制算法能够在复杂扰动下有效抑制电磁铁悬浮间隙振动, 提升悬浮系统的动态性能。

关键词: 磁浮列车; 径向基神经网络; PID控制; 二自由度系统; 悬浮控制

中图分类号: U237; U266.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)02-0058-08

0 引言

高速磁浮交通作为轨道交通的重要组成部分, 是推动交通强国建设的重要抓手^[1]。按悬浮原理, 磁浮列车可分为电磁悬浮型(electric maglev train system, EMS)和电动悬浮型(electro dynamic suspension, EDS), 目前国内主要投入运营的是EMS型磁浮列车^[2], 在EMS型磁浮列车运行过程中, 电磁铁和铁磁轨道之间产生吸引力, 从而实现悬浮^[3-4]。

悬浮系统作为磁浮列车实现无接触运行的关键部分, 其性能直接决定列车运行的安全性和舒适性^[5-6]。为保证磁浮列车运行时的稳定悬浮, 诸多学者开展了悬浮控制相关算法研究。在PID控制改进方面, 文献

[7]提出一种PID反馈控制方法, 相比传统PID提高了控制系统的刚度和抗冲击能力。文献[8]设计二自由度分数阶PID控制器, 在瞬态与频域性能上优于传统PID控制器。文献[9]设计了一种以PID为前馈的滑模周期自适应学习控制, 利用上一周期结果反馈调整滑模参数以获得更优控制效果。在非线性与解耦控制方面, 文献[10]利用反馈线性化技术将输入状态线性化, 设计了PI控制器和对应的非线性补偿器。文献[11]利用基于卡尔曼滤波器的滑模控制算法, 降低了车辆运行时的悬浮间隙和加速度信号响应幅值。文献[12]针对搭接结构提出了一种解耦自抗扰悬浮控制算法, 利用矩阵对角化解耦并引入扩张状态观测器估计的耦合误差, 实现搭接结构左右两侧电磁铁完全解耦。在滑模控制及其改进方面, 文献[13]将滑模控制和自抗扰控制结合,

基金项目: 国家自然科学基金项目(12472020); 河北省重大科技支撑计划项目国际科技合作专项(24292201Z); 河北省全职引进高层次人才科研项目(2024HBQZYCY014)

通信作者: 王美琪, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性动力学、车辆动力学与控制方面的研究; E-mail: wangmeiqi@stdu.edu.cn

引用格式: 张欣超, 郝紫洋, 王美琪, 等. 基于SMS-RBF-PID二自由度悬浮系统控制算法研究[J]. 机车电传动, 2026(2): 58-65.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.007.

Citation: ZHANG Xinchao, HAO Ziyang, WANG Meiqi, et al. Research on control algorithm for 2-DOF suspension system based on SMS-RBF-PID [J]. Electric drive for locomotives, 2026(2): 58-65.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.007.

提出滑模自抗扰悬浮控制, 实现部分传感器失效下的稳定悬浮。文献[14]针对传感器失效问题, 设计了基于状态观测器的容错控制系统。文献[15]提出基于分岔理论稳定性证明的滑模控制方法, 结合径向基函数神经网络的参数自调整功能构建振动抑制模块, 提高了悬浮系统的动态性能。文献[16]将哈密顿-雅可比不等式(HJI)理论引入滑模控制, 实现轨道不平顺激励下的悬浮间隙稳定。文献[17]提出一种自适应模糊非奇异终端滑模控制方法, 在随机外部干扰和轨道不平顺下具有较优的跟踪性能。在神经网络与智能控制方面, 文献[18]提出幅值饱和的自适应控制方法, 准确估计悬浮点的质量并实现位置跟踪。文献[19]设计了一种结合深度置信网络和PID反馈控制器的深度学习控制器, 在外部扰动和轨道不平顺下具有良好的控制性能。文献[20]提出基于RBF神经网络的弹性轨道磁悬浮车辆监督控制方法, 在时滞下仍能实现稳定的悬浮控制。文献[21]根据单点悬浮试验台数据, 采用改进粒子群算法辨识模型参数, 再通过基于VI策略Q学习设计PID-QL控制算法。文献[22]提出一种基于Lyapunov稳定性分析的径向基神经网络逼近算法, 相比PID具有更好的鲁棒性。文献[23]提出神经网络自适应控制方法, 无需精确模型即可处理外部干扰。在自抗扰、模糊及预测控制方面, 文献[24]提出模糊PID控制方法, 通过模糊控制规则调整PID参数, 提高悬浮系统控制精度。文献[25]提出自适应PSO的DMC-FOPID控制算法, 实现更优的气隙跟踪性能。文献[26]提出基于模糊线性自抗扰(Fuzzy-LADRC)的悬浮控制方法, 提高了系统的稳定性和抗干扰能力。文献[27]设计了一种自抗扰广义预测(LADRC-GPC)控制器, 试验表明其适应性与鲁棒性优于传统策略。此外, 文献[28]针对轨道不平顺引起的未知非线性力与传递函数不确定问题, 提出了一种基于模型参考自适应的自学习悬浮控制策略, 控制器参数可根据运行状态自适应调整, 试验结果验证了其具有较强的鲁棒性。

综上所述, 现有控制方法在提升悬浮控制效果和抗干扰能力方面已取得一定成果, 但上述部分控制策略存在参数整定复杂、对系统模型依赖较高等不足。针对上述问题, 本文提出一种滑模面驱动的RBF神经网络补偿PID控制器(SMS-RBF-PID), 其核心思想是以滑模面作为RBF神经网络输入, 结合Adam优化器实现网络权重的在线自适应调节, 利用网络输出电流对PID控制进行在线补偿, 从而改善悬浮控制性能。具体研究路线如下: 首先, 建立考虑弹簧阻尼的二自由度单点悬浮模型, 利用电磁铁的悬浮间隙和速度设计滑模面, 并以其驱动结合Adam优化器改进的RBF神经网络, 生成补偿电流; 然后, 将补偿电流与PID控制电流叠加, 得到最终电流控制律, 构成SMS-RBF-PID控制器。最后, 通过在不同扰动工况下与PID及Back-

stepping控制方法的悬浮效果横向对比, 验证所提控制方法的有效性。

1 二自由度悬浮系统模型搭建

在EMS型磁浮列车的转向架中, 通过结构解耦可实现各悬浮点的单独控制, 因此单点悬浮系统可作为磁浮列车悬浮的基本研究单元。针对考虑弹簧阻尼的二自由度单点悬浮系统进行数学建模, 其结构如图1所示。其中, x_1 、 x_2 分别为电磁铁和车体的位移, m_1 、 m_2 分别为电磁铁与车体的质量, 分析中取向上为正方向。悬浮系统具体参数如表1所示。

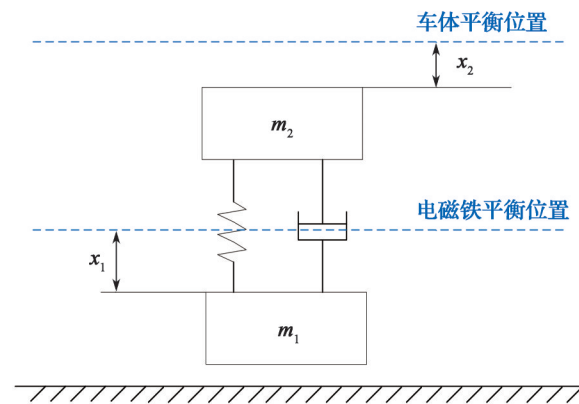


图1 二自由度单点悬浮系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 2-DOF single-point suspension system

表1 悬浮系统参数表

Table 1 Suspension system parameters

物理参数	取值
悬浮架悬浮质量 m_1/kg	100
车体悬浮质量 m_2/kg	230
电磁铁绕组匝数 N	340
电磁铁磁极面积 A_s/mm^2	15 000
目标悬浮间隙 x_{ref}/mm	10
平衡点电流 i_0/A	24.7

在忽略弹簧自身重力及非线性部分且系统处于稳定悬浮状态的前提下, 考虑弹簧阻尼的单点悬浮系统模型如下:

$$\left. \begin{aligned} m_1 a_1 &= F_1(x_1, i) - F_2(x_1, x_2) - m_1 g + f_{1d} \\ m_2 a_2 &= F_2(x_1, x_2) - m_2 g + f_{2d} \\ F_1(x_1, i) &= \frac{\mu_0 N^2 A_s}{4} \left(\frac{i}{x_1} \right)^2 \\ F_2(x_1, x_2) &= k(x_2 - x_1) + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: a_1 为电磁铁加速度; a_2 为车体加速度; f_{1d} 为作用在电磁铁上的外部干扰; f_{2d} 为作用在车体上的外部干扰; μ_0 为真空磁导率; N 为电磁铁线圈匝数; A_s 为电磁铁磁极面积; k 为弹簧刚度; c 为弹簧阻尼系数; i 为控制电流。

为便于计算, 定义 k_d 如下:

$$k_d = \frac{u_0 N^2 A_s}{4} \quad (2)$$

2 SMS-RBF-PID 控制系统搭建

传统 PID 控制器结构简单, 易于实现, 在工业控制中应用广泛, 但在磁浮系统强非线性及外界扰动等工况下, 存在参数无法自适应调节、扰动抑制能力不足等问题。针对上述不足, 引入径向基神经网络对外部扰动进行补偿, 通过滑模面输入使神经网络在线学习外部干扰影响并输出补偿控制量。该方法能够高效补偿外部扰动, 显著提升系统的鲁棒性、动态响应性能及悬浮精度。

设悬浮系统的目标间隙为 x_{ref} , 则跟踪误差可表示为如下:

$$\begin{cases} e = x_{\text{ref}} - x_1 \\ \dot{e} = \dot{x}_{\text{ref}} - \dot{x}_1 \end{cases} \quad (3)$$

定义滑模面 s 如下:

$$s = c_1 e + \dot{e} \quad (4)$$

式中: c_1 为滑模面参数。

RBF 神经网络采用 1-5-1 结构, 第一层为输入层, 用于接收滑模面; 第二层为隐含层, 包含 5 个节点; 第三层为输出层, 输出 RBF 神经网络的输出量 Δi_1 。隐含层的非线性激活函数 h_j 定义如下:

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|s - a_j\|^2}{2d_j^2}\right) \quad (5)$$

式中: a_j 为第 j 个神经元高斯基函数的中心; d_j 为隐含层第 j 个神经元高斯基函数的宽度。

为使得滑模面趋近于零, 设计 RBF 神经网络的损失函数如下:

$$E = \frac{s^2}{2} \quad (6)$$

权重更新梯度 g_w 的计算公式为

$$g_w = -2sh(s) \quad (7)$$

式中: $h(s)$ 为 RBF 神经网络的径向基函数向量。

在神经网络的权重更新过程中, 采用 Adam (adaptive moment estimation) 优化器, 通过对梯度的一阶矩和二阶矩进行联合估计, 实现参数更新步长的自适应调节。相较于采用全局固定学习率的传统梯度下降方法, Adam 能够为不同权重参数分配独立的自适应学习率, 从而提升训练过程的收敛效率与稳定性。

在权重更新过程中, 需计算一阶矩 L_t 、二阶矩 v_t , 以及一阶矩的偏差修正 L_1 和二阶矩的偏差修正 v_1 。一阶矩 L_t 和二阶矩 v_t 的计算公式如下:

$$L_t = \beta_1 L_{t-1} + (1 - \beta_1) g_w \quad (8)$$

$$v_t = \beta_2 v_{t-1} + (1 - \beta_2) g_w^2 \quad (9)$$

式中: β_1 为初始一阶矩衰减因子; β_2 为二阶矩衰减因子。

第 t 次迭代时, 一阶矩的偏差修正 L_1 为

$$L_1 = \frac{L_t}{1 - \beta_1^t} \quad (10)$$

第 t 次迭代时, 二阶矩的偏差修正 v_1 为

$$v_1 = \frac{v_t}{1 - \beta_2^t} \quad (11)$$

第 j 个权重 w_j 的编程计算更新公式为

$$w_j = w_j - \frac{\alpha L_1}{\sqrt{v_1} + \varepsilon} \quad (12)$$

式中: α 为径向基神经网络学习率; $\varepsilon = 10^{-8}$, 作为防止除零项。

神经网络的输出 Δi_1 为

$$\Delta i_1 = w_1 h_1 + w_2 h_2 + w_3 h_3 + w_4 h_4 + w_5 h_5 \quad (13)$$

为增强控制系统的鲁棒性, 提高悬浮系统的控制效果, 在神经网络输出端引入双曲正切函数对补偿信号进行平滑调制, 从而构造最终的补偿输出 Δi_2 , 如式(14)。

$$\Delta i_2 = \Delta i_1 + \eta_2 \tanh(s) \quad (14)$$

式中: η_2 为双曲正切函数的增益项; $\tanh(s)$ 为双曲正切函数。

PID 的控制部分采用传统 PID 控制算法, 电流控制律如式(15)所示。

$$i_{\text{pid}} = k_p e + k_i \int e + k_d \dot{e} \quad (15)$$

式中: k_p 为比例系数; k_i 为积分系数; k_d 为微分系数。

完成 SMS-RBF 补偿系统的构建后, 将其输出与 PID 控制器的输出相叠加, 得到最终的电流控制律, 如式(16)所示。

$$i_c = \Delta i_2 + i_{\text{pid}} + i_0 \quad (16)$$

该控制方法在保持 PID 基本控制稳定性的基础上引入神经网络补偿, 有效提升了控制系统对非线性和外部扰动的适应能力。控制系统的结构框图如图 2 所示。

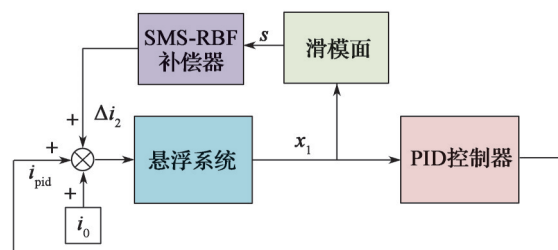


图2 SMS-RBF-PID 控制框图

Fig. 2 Block diagram of SMS-RBF-PID control

3 SMS-RBF-PID 控制系统稳定性分析

Lyapunov 稳定性理论是控制系统稳定性分析的重要工具, 广泛应用于线性及非线性系统的判定。为验

证所设计SMS-RBF-PID控制器的稳定性, 本章基于Lyapunov稳定性理论进行分析, 设计Lyapunov函数 v 为

$$v = \frac{1}{2}s^2 + \frac{\alpha}{2}e^2 \quad (17)$$

式中: $\alpha > 0$ 。

结合式(1)、式(4)和式(16), 对滑模面求导可得

$$\dot{s} = c\dot{e} - \frac{1}{m_1} \left(k_d \frac{i_0^2}{x_1^2} + k_d \frac{(2i_0 + i_c)}{x_1} i_c \right) + \frac{F_2(x_1, x_2)}{m_1} + g - \frac{f_{ld}}{m_1} \quad (18)$$

为便于计算, 进行如下处理:

$$\phi_1(x_1, x_2) = c\dot{e} - \frac{k_d i_0^2}{m_1 x_1^2} + \frac{F_2(x_1, x_2)}{m_1} + g - \frac{f_{ld}}{m_1} \quad (19)$$

$$G_1(x_1, i_c) = \frac{k_d(2i_0 + i_c)}{m_1 x_1} \quad (20)$$

在磁浮列车运行过程中, 存在如下情况:

$$0 < G_{1\min} < G_1(x_1, i_c) < G_{1\max} \quad (21)$$

式中: $G_{1\max}$ 和 $G_{1\min}$ 分别为 $G_1(x_1, i_c)$ 函数的上限和下限。

由式(4)及式(13)~式(16)可得

$$\dot{i}_c = \hat{w}_j h_j + \eta_2 \tanh(s) + k_e e + k_i z + k_d s + i_0 \quad (22)$$

式中: $\hat{w}_j$ 为第 j 个径向基神经网络节点所使用的实际权重; $k_e = (k_p - c_1 k_d)$; $z = \int e_0$ 。

存在理想权重 w_j^* 满足如下公式:

$$\frac{\phi_1(x_1, x_2)}{G_1(x_1, i_c)} = w_j^* h(s) + \varepsilon_1 \quad (23)$$

式中: ε_1 为逼近误差, 该误差存在上限 $\varepsilon_{1\max}$ 。

权重误差 $\tilde{w}_j$ 为:

$$\tilde{w}_j = w_j^* - \hat{w}_j \quad (24)$$

联立式(18)和式(22)可得

$$\dot{s} = G_1(x_1, i_c) \left[w_j^* h(s) + \varepsilon - \eta_2 \tanh(s) - k_e e - k_i z - k_d s - i_0 \right] \quad (25)$$

对Lyapunov函数求导, 可得

$$\dot{v} = s\dot{s} + \alpha e\dot{e} \quad (26)$$

联立式(4)、式(22)和式(26)可得

$$\dot{v} = -G_1 k_d s^2 - \alpha c_1 e^2 + (\alpha - G_1 k_e) s e - G_1 k_i s z - G \eta_2 s \tanh(s) + G_1 s \tilde{w}_j^T h(s) + G_1 s \varepsilon \quad (27)$$

对式(27)中的各项参数作如下处理:

$$z < z_{\max} \quad (28)$$

$$k_\beta = \max_{G_1 \in [G_{1\min}, G_{1\max}]} |\alpha - G_1 k_e| \quad (29)$$

$$|(\alpha - G_1 k_e) s e| \leq k_\beta |s| |e| \quad (30)$$

式中: $z_{\max}$ 为积分项最大值。

由Young不等式可知, 对任意 $\eta_3 > 0$, 使下式成立:

$$k_\beta |s| |e| \leq \frac{\eta_3}{2} s^2 + \frac{k_\beta^2}{2\eta_3} e^2 \quad (31)$$

$$-G_1 k_i s z \leq G_{1\max} |k_i| |s| |z_{\max}| \quad (32)$$

$$G_1 s \tilde{w}_j^T h(s) \leq G_{1\max} \tilde{w}_{j\max} h_{\max} \quad (33)$$

$$G_1 s \varepsilon \leq G_{1\max} \varepsilon_{\max} |s| \quad (34)$$

$$-G_1 \eta_2 s \tanh(s) \leq -G_{1\min} \eta_2 s \tanh(s) \quad (35)$$

式中: $h_{\max}$ 为RBF神经网络基函数向量的最大值。

由式(27)~式(35)可得

$$\dot{v} \leq - \left(G_{1\min} k_d - \frac{\eta_3}{2} \right) s^2 - \left(\alpha c_1 - \frac{k_\beta^2}{2\eta_3} \right) e^2 - G_{1\min} \eta_2 s \tanh(s) + |s| G_{1\max} (|k_i| |z_{\max}| + \tilde{w}_{j\max} h_{\max} + \varepsilon_{\max}) \quad (36)$$

$$\text{令 } \lambda_s = G_{1\min} k_d - \frac{\eta_3}{2}, \quad \lambda_e = \alpha c_1 - \frac{k_\beta^2}{2\eta_3}, \quad \lambda_a =$$

$$G_{1\max} (|k_i| |z_{\max}| + \tilde{w}_{j\max} h_{\max} + \varepsilon_{\max})。$$

当 $\lambda_s > 0$ 、 $\lambda_e > 0$ 时, 可得如下公式:

$$\dot{v} \leq -\lambda_s s^2 - \lambda_e e^2 - G_{1\min} \eta_2 s \tanh(s) + \lambda_a |s| \quad (37)$$

由不等式 $\lambda_a |s| \leq \frac{\lambda_s}{2} s^2 + \frac{\lambda_a^2}{2\lambda_s}$ 可得

$$\dot{v} \leq -\frac{\lambda_s}{2} s^2 - \lambda_e e^2 - G_{1\min} \eta_2 s \tanh(s) + \frac{\lambda_a^2}{2\lambda_s} \quad (38)$$

当 $\frac{\lambda_a^2}{2\lambda_s} < \frac{\lambda_s}{2} s^2 + \lambda_e e^2 + G_{1\min} \eta_2 s \tanh(s)$ 时, $\dot{v} < 0$, 且

系统状态会进入并保持在有界邻域内, 稳定性得证。

4 不同工况下仿真结果验证

为验证所设计控制器的控制效果, 考虑磁浮列车在实际运行中可能受到的外部干扰, 设置以下仿真工况:

① 对各位置施加周期性不平顺干扰力, 以模拟磁浮车辆运行中受到的低频周期扰动, 如式(39)所示。

$$\psi = 1000 \sin 20t + 800 \sin(15t + 1) \quad (39)$$

② 采用不平顺谱拟合运行路线左右侧的垂向不平顺数值, 以模拟建设期间由轨道表面粗糙度、相邻轨道段错位、施工公差、墩高差及支座沉降等因素产生的轨道不平顺^[29-30]。

③ 在不平顺工况下, 于第7 s施加3 000 N的突变力, 以模拟列车运行中的突发情况。

为对比分析PID、Backstepping与本文所提SMS-RBF-PID 3种控制器的控制性能, 通过仿真对各自控制效果进行评估。PID控制器的参数设置为: $k_p=61\ 508$, $k_i=1\ 943\ 374$, $k_d=752.7$; Backstepping控制器参数设置为: $c_2=500$, $c_3=120$; 在SMS-RBF-PID控制器中, RBF神经网络中心向量为 $[-0.131\ 749, -0.047\ 106\ 8, 4.657\ 55 \times 10^{-5}, 0.069\ 513\ 2, 0.123\ 239]$, 宽度向量为 $[0.078\ 188\ 2, 0.065\ 235, 0.056\ 811\ 8, 0.058\ 326\ 6, 0.048\ 173\ 6]$, 学习率 $\alpha=0.01$, 滑模面参数 $c_1=3$ 。

在周期不平顺干扰力工况下, 电磁铁的悬浮间隙响应如图3所示, 车体加速度响应如图4所示。从

图 3、图 4 可以看出，该工况下 SMS-RBF-PID 控制器在电磁铁悬浮间隙和车体加速度方面均表现出更优的控制性能。

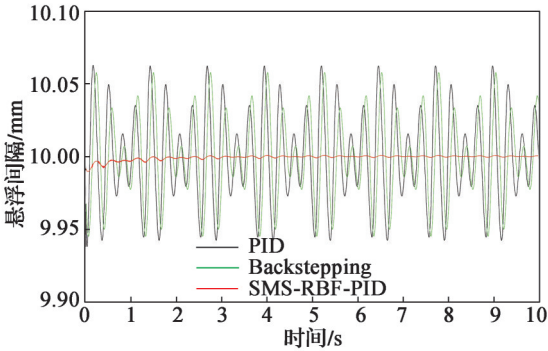


图 3 周期力下悬浮间隙响应
Fig. 3 Suspension gap response under periodic forces

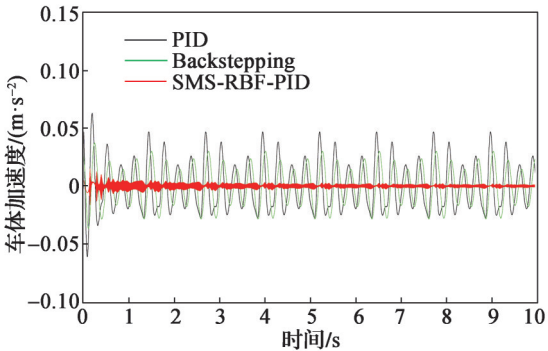


图 4 周期力下车体加速度响应
Fig. 4 Carbody acceleration response under periodic forces

不同控制方法的各项悬浮指标如表 2 所示。在绝对偏差平均值、标准差及峰峰值方面，SMS-RBF-PID 相比 PID 分别提升 96.51%、94.76% 和 91.06%；相比 Backstepping 分别提升 96.13%、94.29% 和 90.10%。上述指标对比表明，SMS-RBF-PID 控制方法在该工况下具有较好的鲁棒性。

表 2 工况一下各控制方法的间隙指标
Table 2 Gap indices of control methods under condition I

控制方法	绝对偏差平均值	标准差	峰峰值
PID	0.026 65	0.031 85	0.124 56
Backstepping	0.024 01	0.029 23	0.112 48
SMS-RBF-PID	0.000 93	0.001 67	0.011 14

在轨道不平顺干扰力工况下，电磁铁的悬浮间隙响应如图 5 所示，车体加速度响应如图 6 所示。从图 5、图 6 可以看出，该工况下 SMS-RBF-PID 控制器的电磁铁悬浮效果和车体加速度响应均显著优于其他两种对比算法。

不同控制方法的各项悬浮指标如表 3 所示。在绝对偏差平均值、标准差及峰峰值方面，SMS-RBF-PID 相比 PID 分别提升 98.32%、98.00% 和 96.15%；相比

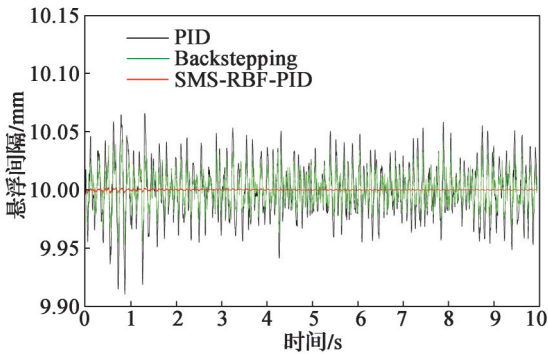


图 5 轨道不平顺下电磁铁间隙响应
Fig. 5 Electromagnet gap response under track irregularities

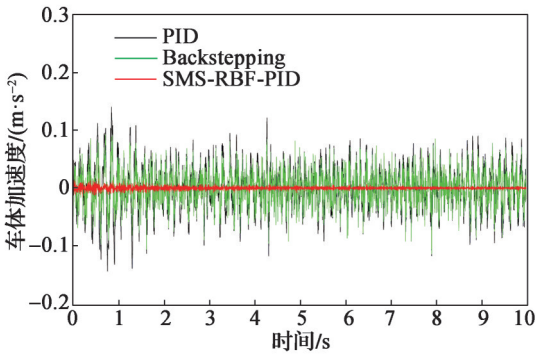


图 6 轨道不平顺下车体加速度响应
Fig. 6 Carbody acceleration response under track irregularities

Backstepping 分别提升了 97.11%、96.56% 和 93.37%。上述指标对比表明，在轨道不平顺工况下，SMS-RBF-PID 控制方法能够实现良好的控制效果，有效保证磁浮系统的稳定运行。

表 3 工况二下各控制方法的间隙指标
Table 3 Gap indices of control methods under condition II

控制方法	绝对偏差平均值	标准差	峰峰值
PID	0.018 40	0.022 99	0.155 38
Backstepping	0.010 74	0.013 37	0.090 15
SMS-RBF-PID	0.000 31	0.000 46	0.005 98

在同时存在轨道不平顺干扰与突变力的工况下，电磁铁的悬浮间隙响应如图 7 所示，车体加速度响应如图 8 所示。由图 7、图 8 可知，第 7 秒施加外部突变力后，不同控制方法下的悬浮间隙和车体加速度均有一定的波动，但 SMS-RBF-PID 控制器下的波动幅度均小于其余两种对比控制方法。

不同控制方法的各项悬浮指标如表 4 所示。在绝对偏差平均值、标准差及峰峰值方面，SMS-RBF-PID 相比 PID 分别提升 81.59%、73.99% 和 66.00%；相比 Backstepping 分别提升 67.45%、52.29% 和 13.09%。上述指标对比表明，在突变力工况下，SMS-RBF-PID 控制方法能够有效抑制突变力带来的干扰，保证单点悬浮系统在遭遇突变力时仍能稳定运行。

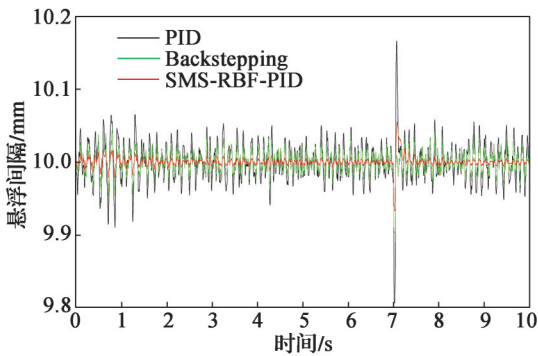


图7 突变力下电磁铁间隙响应

Fig. 7 Electromagnet gap response under sudden force fluctuations

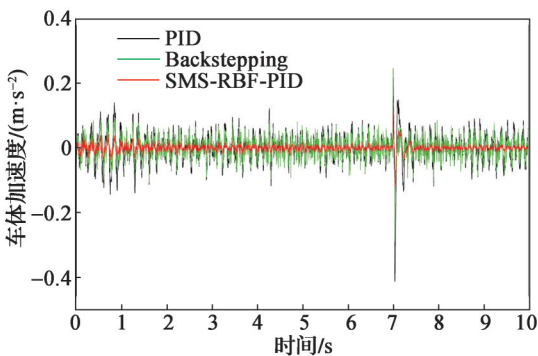


图8 突变力下车体加速度响应

Fig. 8 Carbody acceleration response under sudden force fluctuations

表4 工况三下各控制方法的间隙指标
Table 4 Gap indices of control methods under Condition III

控制方法	绝对偏差平均值	标准差	峰峰值
PID	0.019 61	0.026 80	0.359 52
Backstepping	0.011 09	0.014 61	0.140 65
SMS-RBF-PID	0.003 61	0.006 97	0.122 24

5 结论

针对二自由度悬浮系统, 本文提出一种滑模面驱动的径向基神经网络补偿PID控制算法 (SMS-RBF-PID)。该算法利用滑模面驱动RBF神经网络输出补偿电流, 并结合Adam优化器实现神经网络参数的在线自适应调整, 从而有效提升了系统对非线性动态和外部扰动的鲁棒性。在周期力、轨道不平顺以及不平顺下施加突变力3种工况下的对比表明, SMS-RBF-PID控制在悬浮间隙的绝对偏差平均值、标准差和峰峰值上均优于传统PID和Backstepping控制。仿真结果表明本文算法可显著增强悬浮系统的稳定性和抗干扰能力。

参考文献:

[1] 丁叁叁, 付善强, 梁鑫. 中国高速磁浮交通工程实践与展望[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 40-48.
DING Sansan, FU Shanqiang, LIANG Xin. Engineering

practice and prospect of high-speed maglev transportation in China[J]. Science and technology foresight, 2023, 2(4): 40-48.

[2] 马卫华, 罗世辉, 张敏, 等. 中低速磁浮车辆研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 199-216.
MA Weihua, LUO Shihui, ZHANG Min, et al. Research review on medium and low speed maglev vehicle[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(1): 199-216.

[3] 徐飞, 罗世辉, 邓自刚. 磁悬浮轨道交通关键技术及全速度域应用研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 40-49.
XU Fei, LUO Shihui, DENG Zigang. Study on key technologies and whole speed range application of maglev rail transport[J]. Journal of the China railway society, 2019, 41(3): 40-49.

[4] 邓自刚, 刘宗鑫, 李海涛, 等. 磁悬浮列车发展现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 455-474.
DENG Zigang, LIU Zongxin, LI Haitao, et al. Development status and prospect of maglev train[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2022, 57(3): 455-474.

[5] 胡珂珽, 徐俊起, 刘志刚, 等. 基于强化学习的电磁悬浮型磁浮列车悬浮控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 332-340.
HU Keting, XU Junqi, LIU Zhigang, et al. Reinforcement learning-based suspension control for electromagnetic suspension maglev trains[J]. Journal of Tongji university (natural science), 2023, 51(3): 332-340.

[6] 翟婉明, 赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 209-226.
ZHAI Wanming, ZHAO Chunfa. Frontiers and challenges of sciences and technologies in modern railway engineering [J]. Journal of southwest jiaotong university, 2016, 51(2): 209-226.

[7] 刘恒坤, 郝阿明, 常文森. 磁悬浮系统的非线性PID控制[J]. 控制工程, 2007, 14(6): 653-656.
LIU Hengkun, HAO Aming, CHANG Wensen. Nonlinear PID control of magnetic suspension systems[J]. Control engineering of China, 2007, 14(6): 653-656.

[8] DEY S, BANERJEE S, DEY J. Frequency-domain tuning of a robust optimal 2-DOF fractional order PID controller for a maglev system[J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2024, 20(9): 11348-11361.

[9] 张文静, 阮玉鑫, 高亚苹, 等. 中速磁悬浮列车的滑模周期自适应学习控制方法[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(2): 264-272.
ZHANG Wenjing, RUAN Yuxin, GAO Yaping, et al. Sliding mode periodic adaptive learning control method for medium-speed maglev trains[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2023, 23(2): 264-272.

[10] 龙志强, 洪华杰, 周晓兵. 磁浮列车的非线性控制问题研究[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(3): 399-402.

- LONG Zhiqiang, HONG Huajie, ZHOU Xiaobing. Research of nonlinear control for maglev train[J]. Control theory & applications, 2003, 20(3): 399-402.
- [11] ZARE K, MARDANI M M, VAFAMAND N, et al. Fuzzy-logic-based adaptive proportional-integral sliding mode control for active suspension vehicle systems: Kalman filtering approach[J]. Information technology and control, 2019, 48(4): 648-659.
- [12] 李自康, 王志强, 杨洋, 等. 高速磁悬浮列车搭接悬浮结构解耦自抗扰算法[J]. 铁道学报, 2025, 47(7): 18-27.
LI Zikang, WANG Zhiqiang, YANG Yang, et al. Decoupling active disturbance rejection control algorithm for joint structure levitation frame of high-speed maglev trains[J]. Journal of the China railway society, 2025, 47(7): 18-27.
- [13] 陈萍, 史天成, 于明月, 等. 中低速磁浮列车滑模自抗扰悬浮控制算法[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(2): 682-693.
CHEN Ping, SHI Tiancheng, YU Mingyue, et al. Sliding mode active disturbance rejection levitation control algorithm of the medium- and low-speed maglev vehicles[J]. Journal of railway science and engineering, 2023, 20(2): 682-693.
- [14] ZHAI M D, LONG Z Q, LI X L. Fault-tolerant control of magnetic levitation system based on state observer in high speed maglev train[J]. IEEE access, 2019, 7: 31624-31633.
- [15] 陈琛, 徐俊起, 林国斌, 等. 具有径向基网络加速度反馈的磁浮列车悬浮系统滑模控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 1642-1651.
CHEN Chen, XU Junqi, LIN Guobin, et al. Sliding mode control of maglev train suspension system with neural network acceleration feedback[J]. Journal of Tongji university (natural science), 2021, 49(12): 1642-1651.
- [16] 佟来生, 张文跃, 郑文文, 等. HJI 理论下滑模鲁棒控制对磁浮列车悬浮特性影响研究[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(9): 1439-1443.
TONG Laisheng, ZHANG Wenyue, ZHENG Wenwen, et al. Influence of HJI theory sliding mode robust control on suspension characteristics of maglev train[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2021, 40(9): 1439-1443.
- [17] 孙友刚, 张丹丹, 吉文, 等. 基于模糊补偿的磁浮列车悬浮系统非奇异终端滑模控制[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(4): 803-811.
SUN Yougang, ZHANG Dandan, JI Wen, et al. Fuzzy compensation-based non-singular terminal sliding mode control of maglev vehicle levitation system[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2025, 60(4): 803-811.
- [18] SUN N, FANG Y C, CHEN H. Tracking control for magnetic-suspension systems with online unknown mass identification[J]. Control engineering practice, 2017, 58: 242-253.
- [19] GAO D G, SUN Y G, LUO S H, et al. Deep learning controller design of embedded control system for maglev train via deep belief network algorithm[J]. Design automation for embedded systems, 2020, 24(3): 161-181.
- [20] SUN Y G, XU J Q, LIN G B, et al. RBF neural network-based supervisor control for maglev vehicles on an elastic track with network time delay[J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2022, 18(1): 509-519.
- [21] 陈琛, 徐俊起, 王文, 等. 基于数据驱动的磁悬浮列车悬浮系统参数辨识及控制[J]. 铁道学报, 2025, 47(7): 40-51.
CHEN Chen, XU Junqi, WANG Wen, et al. Parameter identification and control of maglev train levitation system based on data-driven approach[J]. Journal of the China railway society, 2025, 47(7): 40-51.
- [22] 王强. 基于神经网络逼近的磁浮列车动态悬浮控制[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(28): 12117-12123.
WANG Qiang. Dynamic levitation control of maglev train based on neural network approximation[J]. Science technology and engineering, 2021, 21(28): 12117-12123.
- [23] REN Q, ZHANG J M, ZHOU H C, et al. Robust adaptive levitation control for medium and low-speed maglev with magnetic saturation and eddy current effect[J]. Journal of vibration engineering & technologies, 2024, 12(3): 2835-2849.
- [24] 刘丽丽, 左继红. 磁悬浮球系统模糊PID参数自调整控制方法[J]. 控制工程, 2021, 28(2): 354-359.
LIU Lili, ZUO Jihong. Parameter self-adjusting control method of fuzzy PID for magnetic levitation ball system[J]. Control engineering of China, 2021, 28(2): 354-359.
- [25] 过振宇, 李中奇, 谭畅. 基于自适应PSO的DMC-FOPID永磁磁浮列车速度跟踪控制[J]. 铁道学报, 2023, 45(9): 74-84.
GUO Zhenyu, LI Zhongqi, TAN Chang. Speed tracking control of permanent magnet maglev trains based on DMC-FOPID control algorithm and adaptive PSO[J]. Journal of the China railway society, 2023, 45(9): 74-84.
- [26] 杨杰, 李勇群, 张振利, 等. 磁浮F轨的模糊线性自抗扰控制[J/OL]. 控制工程. (2025-03-26) [2026-01-16]. <https://link.cnki.net/doi/10.14107/j.cnki.kzgc.20240914>.
YANG Jie, LI Yongqun, ZHANG Zhenli, et al. Fuzzy linear active disturbance rejection control of maglev F-rail[J/OL]. Control engineering of China. (2025-03-26) [2026-01-16]. <https://link.cnki.net/doi/10.14107/j.cnki.kzgc.20240914>.
- [27] 王金锁, 蒋启龙, 罗雨, 等. 磁悬浮系统自抗扰广义预测控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(9): 141-150.
WANG Jinsuo, JIANG Qilong, LUO Yu, et al. Active disturbance rejection generalized predictive control for magnetic levitation system[J]. Journal of Harbin institute of technology, 2022, 54(9): 141-150.
- [28] 陈萍, 史天成, 于明月, 等. 基于模型参考自适应的自学习悬浮控制策略[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(4): 799-

807.

CHEN Ping, SHI Tiancheng, YU Mingyue, et al. Self-learning model reference adaptive levitation control strategy

[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2023, 58(4): 799-807.

Research on control algorithm for 2-DOF suspension system
based on SMS-RBF-PID

ZHANG Xinchao¹, HAO Ziyang², WANG Meiqi², YAN Yifan³, LIU Pengfei², WANG Ruichen²

- (1. CRRC Information Technology Co., Ltd., Beijing 100084, China;
2. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;
3. CRRC Academy Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: This paper presents the design of a sliding mode surface driven radial basis function neural network compensated proportional-integral-derivative controller (SMS-RBF-PID) to ensure suspension stability of two-degree-of-freedom (2-DOF) suspension systems. An improved radial basis neural network compensator based on sliding mode surface drive was constructed for compensation current output. The compensator learned external disturbances online through the sliding mode surface, and the Adam optimizer was used to update weights in the neural network, to improve the controller’s ability to compensate for external disturbances. The PID output was then combined with the compensation current to form the electromagnet current control law, thus yielding the SMS-RBF-PID controller. Simulation results show that the SMS-RBF compensator effectively overcomes the weak anti-interference performance of traditional PID controllers, and the proposed control algorithm effectively suppresses vibrations in the electromagnet suspension gap under complex disturbances, thereby improving the dynamic performance of the suspension systems.

Keywords: maglev train; radial basis function neural network (RBFNN); PID control; 2-DOF system; suspension control

收稿日期: 2026-02-15; 修回日期: 2026-02-26
责任编辑: 文 韬