

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

陈琛^{1,2,3}, 徐俊起², 林国斌², 荣立军², 孙友刚²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 国家磁浮交通工程技术研究中心, 上海 201804;
3. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要: 为了保证磁浮列车的悬浮稳定性, 研究了悬浮系统的主动控制问题。首先, 基于磁浮列车单电磁铁最小悬浮单元建立了对应的电流控制数学模型, 并结合仿真说明了比例-积分-微分(PID)控制算法对非线性负载等时变干扰非常敏感的问题; 然后, 提出了一种采用分岔理论稳定性证明的滑模控制方法, 并结合径向基函数(RBF)神经网络的参数自调整功能构建了具有振动抑制的悬浮控制模块, 有效地抑制了电磁铁振动; 最后, 通过构造 Simulink 控制模型并搭建单电磁铁悬浮试验平台进行仿真和试验。结果表明: 电磁铁振动对悬浮性能的影响尤为明显, 所提出控制算法能够在复杂扰动存在的条件下对电磁铁振动进行有效抑制, 并提高悬浮系统的动态性能。

关键词: 磁浮列车; 悬浮系统非线性模型; 滑模控制; 加速度反馈; 径向基函数(RBF)补偿控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Sliding Mode Control of Maglev Train Suspension System with Neural Network Acceleration Feedback

CHEN Chen^{1,2,3}, XU Junqi², LIN Guobin², RONG Lijun²,
SUN Yougang²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. National Maglev Transportation Engineering R&D Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to ensure the suspension stability of maglev train, the active control of suspension system is studied. Firstly, based on the minimum suspension unit of

single electromagnet of maglev train, the corresponding control mathematical model of current is established. Combined with the simulation, it is shown that the proportion-integration-differentiation (PID) control algorithm is very sensitive to time-varying disturbances such as nonlinear load. Then, a sliding mode control method based on the stability proof of bifurcation theory is proposed. Combined with the parameter self-adjusting function of radial basis function (RBF) neural network, a suspension control module with vibration suppression is constructed to effectively suppress the vibration of electromagnet. Finally, the Simulink control model is constructed and the single electromagnet suspension experimental platform is built for relevant simulation and experiments. The results show that the effect of electromagnet vibration on the suspension performance is particularly obvious. The proposed control algorithm can effectively suppress the electromagnet vibration in the presence of complex disturbances and improve the dynamic performance of the suspension system.

Key words: maglev train; nonlinear model of levitation system; sliding mode control; acceleration feedback; radial basis function (RBF) compensation control

磁浮列车的无接触运行能够有效降低维护成本, 具有低噪音下高速运行的可行性。悬浮系统是磁浮列车的重要组成部分, 其在很小的可调间隔内的稳定性控制是磁浮领域最经典、最具挑战性的内容之一^[1-4]。

由于线性控制的局限性, 因此磁耦合引起的车-

收稿日期: 2021-01-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52072269); 国家自然科学基金青年基金(51905380)

第一作者: 陈琛(1993—), 男, 博士生, 主要研究方向为磁浮列车悬浮控制及车-轨耦合动力学分析。

E-mail: c_chen_brightness@tongji.edu.cn

通信作者: 徐俊起(1977—), 男, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为磁浮列车悬浮控制技术及车-轨耦合动力学。

E-mail: xujunqi@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

轨共振对磁浮列车的运行稳定性有很大影响。另外,如果在复杂扰动(负载不规则变化扰动、轨道梁挠度变形以及F型轨接缝造成的不平顺扰动)下悬浮间隙控制响应不及时或无法自适应收敛就会导致列车悬浮失稳。为了有效提高悬浮稳定性,抑制磁耦合振动,有必要结合列车悬浮系统的动态性能,研究一种更可靠的含有振动抑制功能的悬浮控制算法^[5-7]。Wai等^[8-9]针对具有非负输入的线性磁浮列车磁轨系统设计了一个具有强鲁棒性的模糊神经网络控制(RFNNC)方案,并在不确定因素存在的情况下保证被控系统的稳定性。刘丽丽等^[10]针对悬浮系统非线性和迟滞性的特点,提出一种模糊比例-积分-微分(PID)控制算法来降低数学模型的精确性,并且通过模糊推理实现参数调整,从而提高系统的自适应能力。王军晓等^[11]针对复杂扰动下的磁浮球系统提出了一种基于等价输入干扰滑模观测器的模型预测控制(MPC+EIDSMO)方法,实现对期望悬浮间隙跟踪的快速性和准确性。Chen等^[12]基于柔性轨道简支梁和单电磁铁最小悬浮单元设计了滑模自适应状态反馈控制器,并通过仿真和试验与PID控制器和滑模控制器进行对比来说明算法的优越性。Zhang等^[13]针对不同时滞环境下的磁浮系统进行了研究,采用多尺度法计算了Hopf分岔的正规型,并通过数值仿真来验证理论分析的正确性。Su等^[14]基于模糊理论对有界且小可调区间的悬浮间隙进行了自适应控制,验证了所提出算法在有界扰动下的抗干扰能力。王辉等^[15]对柔性轨道下的悬浮状态变量进行研究,并且采用状态预测的方式解决控制性能下降的问题,但是该方法的参数学习能力较弱,无法基于扰动的变化进行自适应调整。

现有的悬浮控制算法在设计过程中没有考虑不规则激励等时变动态扰动,缺乏根据列车振动情况进行的加速度自适应补偿,这就产生了振动激励叠加的情况下悬浮稳定性降低的问题。针对悬浮运行过程中时变激励下的振动抑制问题,提出了一种加速度补偿算法。首先,基于指数趋近律为最小悬浮单元设计了滑模控制(SMBC)算法,并根据稳定性分析确定了具体参数;然后,基于径向基函数(RBF)神经网络的权值自学习功能设计加速度补偿模块,对当前振动采样值进行判断,并进行控制补偿,构造SMBC-AFC (acceleration feedback compensation)算法。最后,在单点悬浮试验台上对所提出控制算法进行了验证。

1 悬浮系统建模

磁浮列车通常有多个悬浮点来提供悬浮力。由于悬浮底盘的结构解耦,单点悬浮系统可以作为磁浮列车整体悬浮系统的基本单元^[4],因此对单点悬浮系统的讨论更具有普遍性。简化后的最小单元悬浮控制模型如图1所示。其中, z_{ref} 为期望悬浮间隙, z_E 为电磁铁垂向振动位移(在不考虑轨道变形时可视为悬浮间隙), $\Delta z_1 = z_E - z_{\text{ref}}$ 为悬浮间隙误差, F_L 为悬浮力, m_E 为电磁铁质量, m_D 为可变负载质量, L 为轨道梁跨度, R 为电磁铁绕组电阻, C 为电磁铁绕组电感, i_c 为控制电流^[16]。

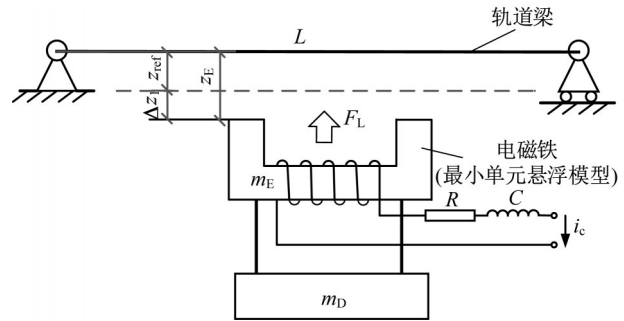


图1 悬浮控制模型

Fig.1 Levitation control model

取 $X_c = (\dot{x}_1, \dot{x}_2)^T = (\dot{z}_E, \dot{z}_E)^T$, 单点悬浮系统电流控制的二阶模型可以进行如下描述^[16]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g - \frac{\mu_0 N^2 A}{4(m_E + m_D)} \frac{(i_{\text{ref}} + i_c)^2}{x_1^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_1 为悬浮间隙对应的状态变量; x_2 为悬浮间隙变化速度对应的状态变量; μ_0 为真空磁导率; g 为重力加速度; N 为电磁铁线圈匝数; A 为电磁铁磁极面积; i_{ref} 为平衡点位置期望电流。根据式(1)可以看出,系统控制电流 i_c 和输出悬浮间隙 x_1 具有二阶耦合关系,因此系统具有较强的非线性。车-桥耦合系统参数如表1所示。

定义状态变量 $y_1 = \Delta z_1$, $y_2 = \Delta \dot{z}_1$, 取 $Y_c = (\dot{y}_1, \dot{y}_2)^T = (\Delta \dot{z}_1, \Delta \ddot{z}_1)^T$, 对式(1)在平衡点 $(z_{\text{ref}}, i_{\text{ref}})$ 处进行线性化,如下所示:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = \frac{\mu_0 N^2 A}{2(m_E + m_D)} \frac{i_{\text{ref}}^2}{z_{\text{ref}}^3} y_1 - \frac{\mu_0 N^2 A}{2(m_E + m_D)} \frac{i_{\text{ref}}}{z_{\text{ref}}^2} i_c \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δz_1 、 $\Delta \dot{z}_1$ 分别为悬浮间隙误差与误差变化

表1 悬浮系统模型参数

Tab.1 Parameters of suspension system model

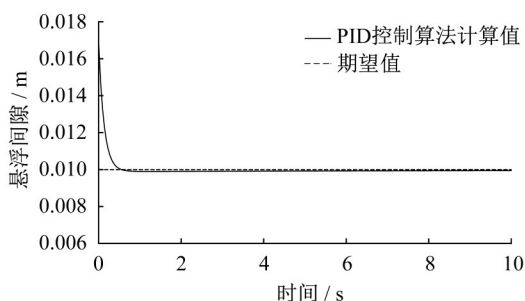
变量名	变量值
m_E/kg	60
m_D/kg	250(满载)
N	340
A/m^2	0.024
μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$
R/Ω	1.2
L/m	24.94
z_{ref}/m	0.010
i_{ref}/A	20.55

速度。

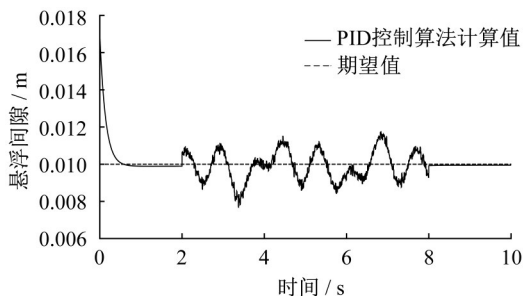
2 基于指数趋近律实时反馈的非线性控制律

2.1 PID控制局限性说明

PID控制算法具有性能可靠、原理简单、稳定性好等优点,在悬浮模型等非线性系统中得到了广泛的应用。根据文献[15-16]对悬架控制算法的研究,采用Nyquist准则和根轨迹法确定PID控制算法的参数,其中 $K_p=14\ 000$, $K_i=500$, $K_d=800$ 。悬浮性能如图2所示。



a 无扰动下悬浮间隙



b 不规则负载力下悬浮间隙

图2 基于PID控制的仿真结果

Fig.2 Simulation results based on PID control

列车运行不可避免地受到外界因素的干扰,如车厢内乘客移动引起的荷载变化和轨道梁间连接处

的不平顺等。由图2b可以看出,在不规则负载力的作用下,悬浮间隙发生较大波动,因此研究扰动下的动态悬浮过程对提高系统的稳定性和抗干扰能力具有重要意义。

2.2 基于指数趋近律的滑模控制器

为了得到基于指数逼近律的滑模控制律,定义Lyapunov函数 $V=(1/2)s^2$,其中 s 为跟踪误差函数。指数逼近律定义如下所示:

$$\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn} s - ks, \epsilon > 0, k > 0 \quad (3)$$

式中: ϵ 为系统向滑模面 $s=0$ 逼近的速度; k 为指数逼近项的速率因子。对Lyapunov函数 V 进行求导,并且保证 $\dot{V} \leq 0$,代入式(3)可以得到:

$$\dot{V} \leq -\epsilon |s| - ks^2 = -\frac{k}{2} V - \epsilon |s| \leq -\frac{k}{2} V \quad (4)$$

对于 $[V(0), V(\infty)] \in \mathbf{R}, \forall t \geq t_0 \geq 0$ 时不等式 $\dot{V} \leq -\alpha V + f(t)$ 的解如下所示:

$$V(t) \leq e^{-\alpha(t-t_0)} V(t_0) + \int_{t_0}^t e^{-\alpha(t-\tau)} f(\tau) d\tau \quad (5)$$

式中: α 为任一正常数; $f(t)$ 为非线性函数; t 为时间变量; t_0 为系统达到稳定状态对应的时刻。根据Hurwitz证明过程^[17],当 α 为一正常数且 $f(t)=0$ 时, $V(t)$ 趋近于0。此时,结合式(4)和式(5),令 $\alpha = \frac{k}{2}, \dot{V} \leq -\frac{k}{2} V$ 的解为

$$V(t) \leq e^{-\frac{k}{2}(t-t_0)} V(t_0) \quad (6)$$

为了保证快速到达滑动面,同时消除抖振现象,在式(3)中可适当增大 k ,减小 ϵ ^[12]。

结合如图1所示悬浮模型,令 $e = \Delta z_1$,跟踪误差函数 s 可以被定义为

$$s = ce + \dot{e} \quad (7)$$

式中: c 为收敛速率的影响因子。式(7)的导数与式(3)等价,代入式(1)可以得到

$$-\epsilon \operatorname{sgn} s - ks = c\dot{z}_E + \frac{\mu_0 N^2 A}{2(m_E + m_D)} \frac{i_{\text{ref}}^2}{z_{\text{ref}}^3} e - \frac{\mu_0 N^2 A}{2(m_E + m_D)} \frac{i_{\text{ref}}}{z_{\text{ref}}^2} i_c \quad (8)$$

加入平衡点电流 i_{ref} ,并通过进一步求解控制量得到基于指数逼近律的滑模控制律的控制电流,如下所示:

$$i_c = \frac{2(m_E + m_D) z_{\text{ref}}^2 c \dot{z}_E}{\mu_0 N^2 A i_{\text{ref}}} + \frac{i_{\text{ref}}}{z_{\text{ref}}} \Delta \dot{z}_1 + \frac{2(\epsilon \operatorname{sgn} s + k(c \Delta z_1 + \Delta \dot{z}_1))(m_E + m_D) z_{\text{ref}}^2}{\mu_0 N^2 A i_{\text{ref}}} \quad (9)$$

2.3 稳定性分析

对于悬浮系统,当控制量(控制电流)或扰动(不

规则性/负载)发生变化并超过某一临界值时,系统的稳定性会发生突变。然而,式(9)中给出的控制律没有考虑参数摄动所引起的不稳定现象。为了抑制不平顺或荷载引起的竖向振动,对式(9)中给出的控制律进行稳定性分析,进一步得到了控制参数的可取范围。

根据图1中的定义 $\Delta z_1 = z_E - z_{\text{ref}}$,并且 $e = \Delta z_1$,可知 $\dot{z}_E = \Delta \dot{z}_1$,因此对式(9)进行化简,如下所示:

$$\dot{z}_c = \left(\frac{2(m_E + m_D)z_{\text{ref}}^2(k+c)}{\mu_0 N^2 A i_{\text{ref}}^2} + \frac{i_{\text{ref}}}{z_{\text{ref}}} \right) \Delta \dot{z}_1 +$$

$$J(\lambda) = \begin{bmatrix} \lambda & -1 \\ -\left(\frac{\mu_0 N^2 A i_{\text{ref}}^2}{2ck(m_E + m_D)z_{\text{ref}}^3} + 1 \right) & \lambda - \left(k+c + \frac{\mu_0 N^2 A i_{\text{ref}}^2}{2(m_E + m_D)z_{\text{ref}}^2} \right) \end{bmatrix} \quad (12)$$

进一步计算可得特征方程,如下所示:

$$\lambda^2 - \left(k+c + \frac{\mu_0 N^2 A i_{\text{ref}}^2}{2(m_E + m_D)z_{\text{ref}}^2} \right) \lambda + \left(\frac{\mu_0 N^2 A i_{\text{ref}}^2}{2ck(m_E + m_D)z_{\text{ref}}^3} + 1 \right) = 0 \quad (13)$$

根据Routh-Hurwitz判据可知,为了满足式(12)所示特征方程的根均具有负实部,控制参数需要满

$$\frac{2ck(m_E + m_D)z_{\text{ref}}^2}{\mu_0 N^2 A i_{\text{ref}}^2} \Delta z_1 + \frac{2\epsilon(m_E + m_D)z_{\text{ref}}^2 \text{sgn } s}{\mu_0 N^2 A i_{\text{ref}}^2} \quad (10)$$

将式(10)代入式(2),可得

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = \left(\frac{\mu_0 N^2 A i_{\text{ref}}^2}{2ck(m_E + m_D)z_{\text{ref}}^3} + 1 \right) y_1 + \left(k+c + \frac{\mu_0 N^2 A i_{\text{ref}}^2}{2(m_E + m_D)z_{\text{ref}}^2} \right) y_2 + \epsilon \text{sgn } s \end{cases} \quad (11)$$

可得对应的特征矩阵,如下所示:

$$J(\lambda) = \begin{bmatrix} \lambda & -1 \\ -\left(\frac{\mu_0 N^2 A i_{\text{ref}}^2}{2ck(m_E + m_D)z_{\text{ref}}^3} + 1 \right) & \lambda - \left(k+c + \frac{\mu_0 N^2 A i_{\text{ref}}^2}{2(m_E + m_D)z_{\text{ref}}^2} \right) \end{bmatrix} \quad (12)$$

足以下边界条件:

$$\begin{aligned} k+c + \frac{\mu_0 N^2 A i_{\text{ref}}^2}{2(m_E + m_D)z_{\text{ref}}^2} &< 0, \\ \frac{\mu_0 N^2 A i_{\text{ref}}^2}{2ck(m_E + m_D)z_{\text{ref}}^3} + 1 &> 0 \end{aligned} \quad (14)$$

在空载工况下($m_D = 0$)对式(13)进行求解并得到特征根,代入如表1所示参数,得到

$$\lambda_{1,2} = \frac{k+c + 122.6312 \pm \sqrt{(k+c + 122.6312)^2 - 49056}}{2} \quad (15)$$

式(14)确保特征根具有负实部,通过对 k 和 c 的取值确定约束条件,即 $k+c < -122.6312$ 。虚部的求解必然满足这一约束条件,因此求解结果如图3所示。

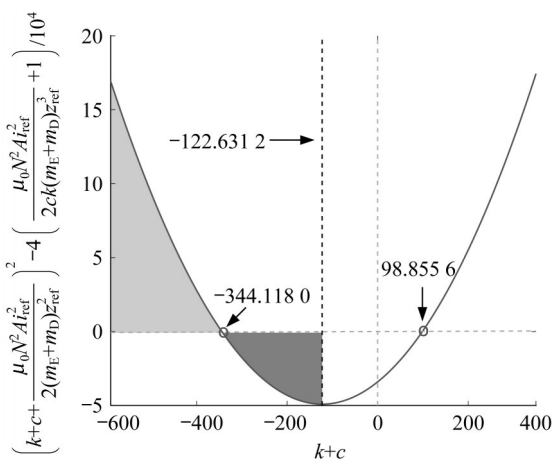


图3 特征根求解结果(空载)

Fig.3 Solution results of characteristic root (no loading)

结合式(14),根据Routh-Hurwitz判据的相关结论可以看出,当 $k+c < -344.1180$ 时,系统必定具有负实部,并且不存在虚部;当 $-344.1180 < k+c < -122.6312$ 时,特征根存在虚部。设特征根 $\lambda = \alpha \pm i\beta$,此时可将控制系统看作存在阻尼的线弹性问题。 α 的负数特性表征了系统具有渐进稳定性, β 表示系统振动快慢程度。

当 $k+c = -122.6312$ 时,系统实部为零,此时平衡点的稳定性将发生变化。然而,根据 $k+c$ 的取值(特征根具有负实部恒成立),平衡点保持稳定,表明此时所定义的控制参数范围满足稳定性条件。

β 在 $-344.1180 < k+c < -122.6312$ 区间内的变化范围如图4所示。由图4可知,当 $k+c = -344.1180$ 时,虚部为零。此时,能够在最大程度上抑制电磁铁振动。

在满载工况下($m_D = 250 \text{ kg}$)进行如式(15)所示的相同计算,得到

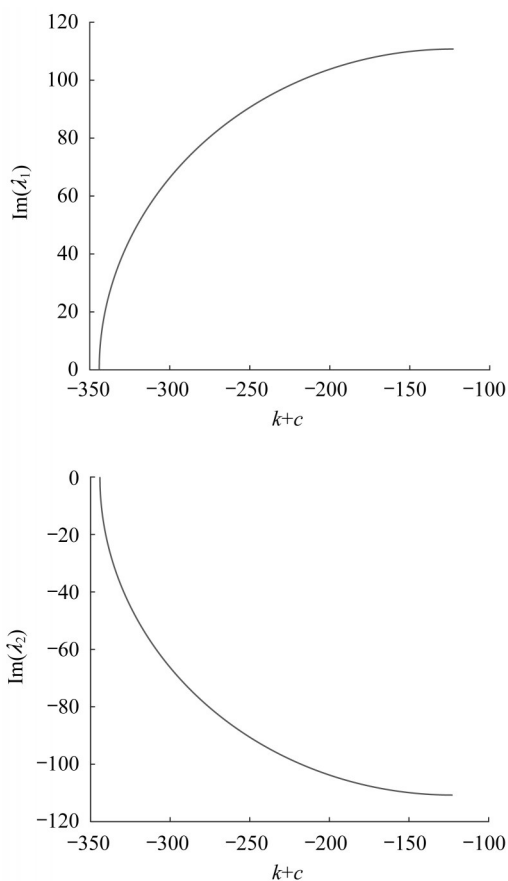


图4 特征根虚部变化规律(空载)

Fig.4 Variation of imaginary part of characteristic root (no loading)

$$\lambda_{1,2} = \frac{k+c+23.7351 \pm \sqrt{(k+c+23.7351)^2 - 9498}}{2} \quad (16)$$

为保证特征多项式各项系数大于零,一定满足 $k+c < -23.7351$ 。满载工况下特征根求解结果如图5所示。

同理,当 $k+c < -121.1926$ 时,系统必定具有负实部,并且不存在虚部。当 $-121.1926 < k+c < -23.7351$ 时,特征根存在虚部。虚部 β 的值越小,说明振动抑制能力越强。 β 的变化情况如图6所示。

2.4 实时加速度补偿优化

根据式(10),控制电流 i_c 所需的主要反馈变量为悬浮间隙和振动加速度。 y_2 可通过对反馈变量进行求导或积分获得。然而,根据以往的工程经验,加速度是描述振动最直接的变量,因此有必要对加速度进行反馈。在采集电磁铁的振动加速度后,还可以根据加速度计算 y_{2o} 。

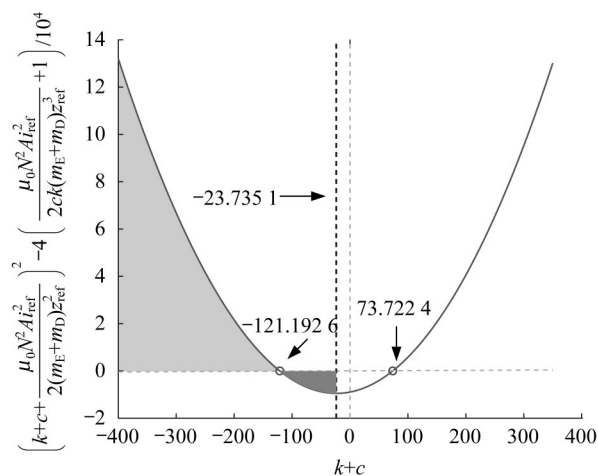


图5 特征根求解结果(满载)

Fig.5 Solution results of characteristic root (full loading)

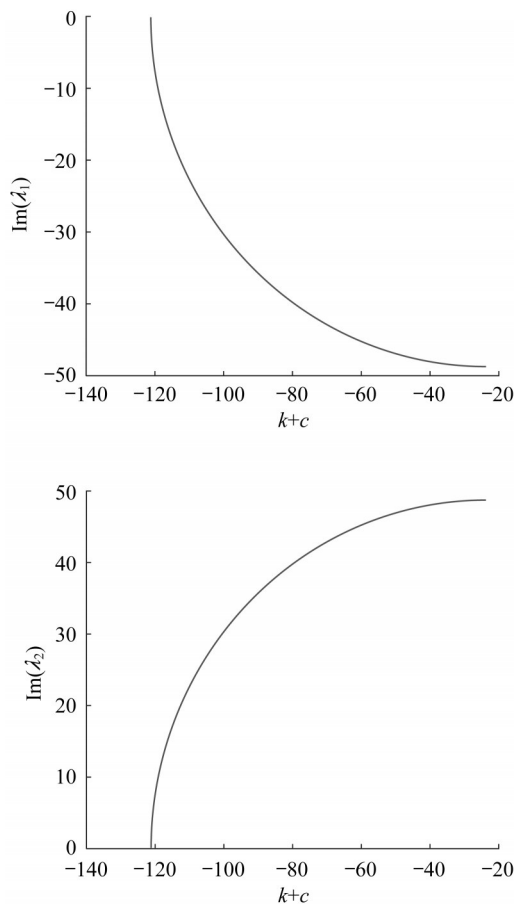
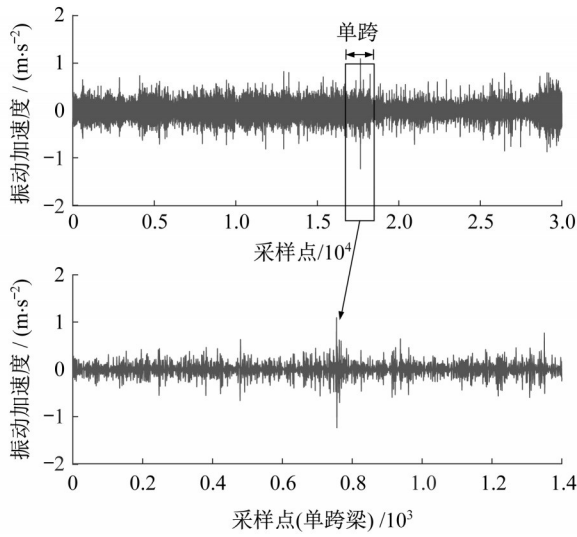


图6 特征根虚部变化规律(满载)

Fig.6 Variation of imaginary part of characteristic root (full loading)

图7为上海临港中低速磁浮试验线实际试验中,电磁铁(车辆)在 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度下的垂向振动加速度。试验结果表明,列车运行到跨中时,由于轨道

图7 60 km h⁻¹时电磁铁振动Fig.7 Vibration of electromagnet at the speed of 60 km h⁻¹

梁(桥)的挠曲变形,电磁铁的垂向振动加速度峰值达到 $1.24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,振动最为显著。整个试验过程中,特别当列车在跨中时,加速度需要进一步调整。结合动力学分析,基于加速度反馈的振动(加速度)抑制可以有效提高悬架系统的稳定性。

在此基础上,首先提出了最简单的加速度反馈比例抑振电流 i_s ,计算式如下所示。

$$i_s = -k_{sv} \ddot{z}_E \quad (17)$$

式中: k_{sv} 为加速度反馈增益。

结合式(10)所示滑模控制算法,可以得到所需的具有神经网络加速度反馈的滑模控制算法的控制电流 i_{cs} ,表达式如下所示:

$$i_{cs} = \frac{2(m_E + m_D)z_{ref}^2 c \dot{z}_E}{\mu_0 N^2 A i_{ref}} + \frac{i_{ref}}{z_{ref}} \Delta \dot{z}_1 + \frac{2(\epsilon \operatorname{sgn} s + k(c \Delta z_1 + \Delta \dot{z}_1))(m_E + m_D)z_{ref}^2}{\mu_0 N^2 A i_{ref}} - k_{sv} \ddot{z}_E \quad (18)$$

然而,在振动频率过高时式(17)所示控制算法可能出现调整不及时引起的共振问题。另外,这种加速度反馈方法没有学习能力,不能适应多扰动、复杂工况下的悬浮运行。因此,结合径向基函数神经网络进行深度学习来抑制振动。在将轨道视为刚体的前提下采集电磁铁振动变量 $\ddot{z}_{Eb}$ 作为网络输入,控制电流 i_{sN} 作为网络输出,采用1-5-1网络,如图8a所示。将 $(l-1)$ 时刻的控制电流以及 $(l-1)$ 时刻和 $(l-2)$ 时刻的振动加速度作为网络输入,采用如图8b所示的网络进行辨识,得到的网络输出为 l 时刻的电磁铁振动变量 $\ddot{z}_{Eb}$ 。图8中, q 和 $p_i (i=1,2,3)$ 分别

为RBFC(radial basis function control)模块和RBFi(radial basis function identification)模块的输入层神经元, h_j 和 w_j 、 b_j 和 $v_j (j=1 \sim 5)$ 分别为RBFC模块和RBFi模块的隐含层神经元及其对应的网络权值, l 为离散时间变量。

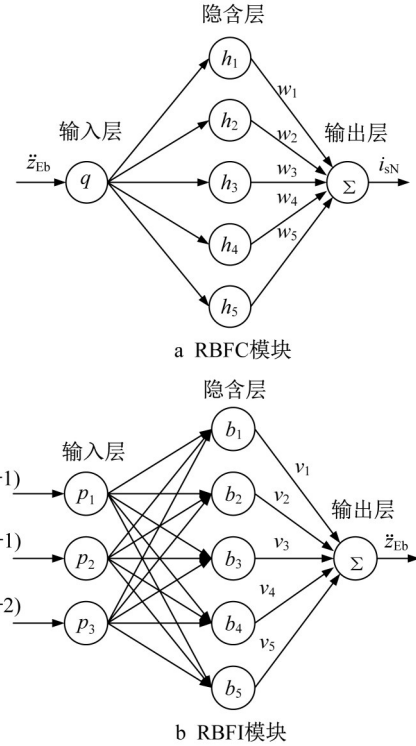


图8 RBF神经网络结构

Fig.8 Structure of RBF neural network

图9为基于RBF神经网络的深度学习控制框图。结合如式(2)所示悬浮系统,分别设计了RBFC模块(用于控制)和RBFi模块(用于学习),使系统在复杂的多扰动条件下能够学习并逼近振动期望值(0)从而抑制振动。RBFC模块的输入为电磁铁振动的偏差 $\ddot{z}_{Eb}$ 。由于理想情况下预期振动为零,因此 $\ddot{z}_E = \ddot{z}_{Eb}$ 。隐含层的输出用非线性激活函数 h_j 表示,如下所示:

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|\ddot{z}_{Eb} - a_j\|^2}{2d_j^2}\right) \quad (19)$$

式中: a_j 为隐含层第 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。

网络的输出抑振电流 i_{sN} 与算法修正后的总控制电流 i_{csN} 为

$$i_{sN} = w_1 h_1 + w_2 h_2 + w_3 h_3 + w_4 h_4 + w_5 h_5, i_{csN} = i_c + i_{sN} \quad (20)$$

由于控制的目的是使电磁铁在复杂工况下的振

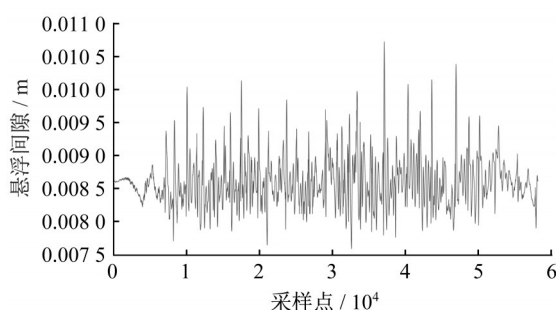


图 11 上海临港中低速磁浮试验车运行中的悬浮间隙
Fig.11 Suspension gap of Shanghai Lingang medium-low speed maglev test train in operation

悬浮间隙也逐渐增大。当随机扰动幅值为 $\pm 0.3g$ 时,电流为 33 A,对电流影响较大,不利于悬浮稳定。当 $t \in [8, 13)$ s (SMBC-AFC 算法控制) 时,输出悬浮间隙在相同扰动下的稳定性得到显著提高,最大偏差为 1.43 mm。

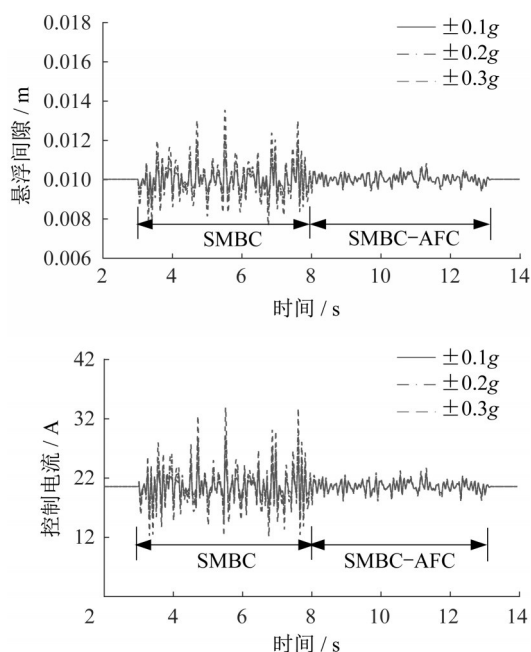


图 12 不同振动扰动下的悬浮控制结果
Fig.12 Suspension control results under different vibration disturbances

4 试验验证

4.1 试验设计与实施

基于单点悬浮试验台验证所提出控制算法的实际性能。硬件包括电磁铁、负载、固定横梁、dSPACE 平台等。悬浮系统由输入/输出(I/O)接口电路、信号传输电路、悬浮控制电路和斩波电路组成。

控制逻辑采用基于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的 Verilog 语言编写,悬浮控制逻辑如图 13 所示。在 Simulink 平台编写控制算法,并基于 dSPACE 仿真系统实现实时控制。单点悬浮试验台控制结构框图如图 14 所示。

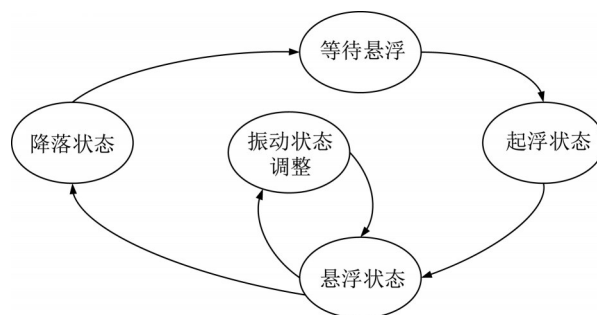


图 13 悬浮控制逻辑结构
Fig.13 Levitation control logic structure

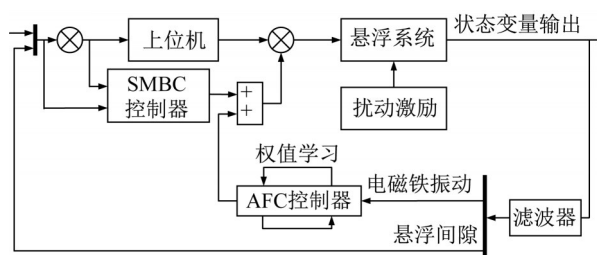


图 14 单点悬浮试验台控制系统结构框图
Fig.14 Block diagram of control system structure for single-point suspension test platform

4.2 结果分析

基于单点悬浮试验台的静态悬浮初步试验结果如图 15 所示。

如图 15a、b 所示,在静态悬浮过程中,3 种控制算法都能达到很好的控制效果,响应速度快,静态误差小。所提出的 SMBC 算法和 SMBC-AFC 算法可以进一步加快响应速度,减小超调。稳定悬挂后,悬浮间隙为 10.015 mm。所提出的算法能够降低大电流的影响(PID 算法控制下的峰值电流为 24.14 A, SMBC 和 SMBC-AFC 算法控制下的峰值电流为 20.71 A),比 PID 控制算法更能保证系统的安全性。

电磁铁的振动加速度如图 15c 所示。在不进行悬浮操作时($t < 2$ s),由于系统已通电,在电磁线圈影响下,加速度传感器接收到的振动信号有电磁干扰,在悬浮稳定时($t > 2.3$ s),接收到的信号同样受到电磁干扰影响。此时,传输给控制算法的信号可能会导致悬架间隙跟踪不准确等问题。从图 15c 的比较可以看出,所提出的算法不仅可以有效地降低

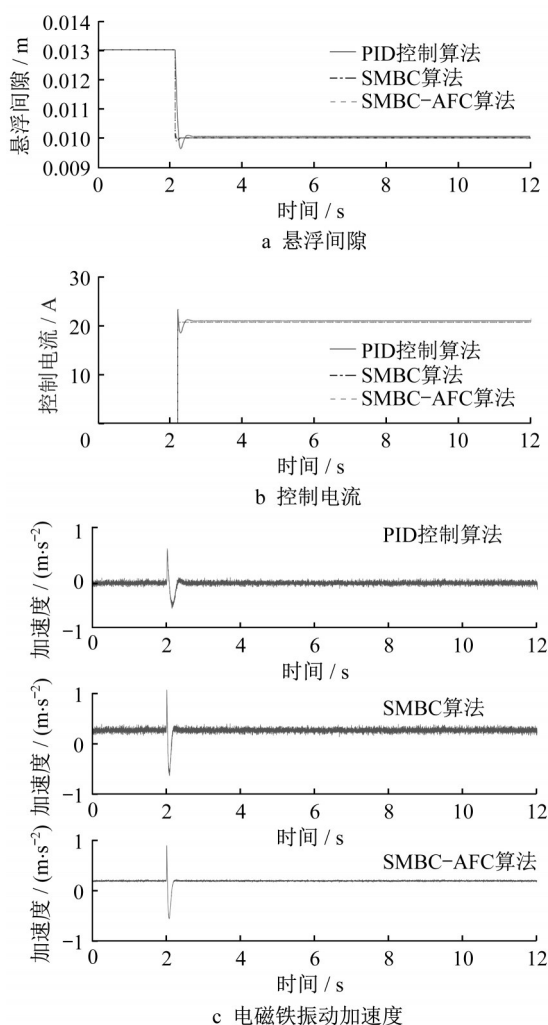


图15 不同算法下的悬浮控制结果

Fig.15 Suspension control results under different algorithms

电磁铁在浮动过程中的加速度峰值,还可以滤除电磁干扰(因为本试验是静态悬浮,不需要抑制电磁振动),从而提高悬浮间隙跟踪的精度。

由于列车的悬浮过程处于静态悬浮阶段,因此假设动态扰动忽略不计。在进一步研究动态扰动对系统的影响时,只对稳定悬浮后的部分进行分析。

如图15所示,模拟时间 t 设定为12s,当 $t=2$ s时,按下悬浮指令,当 $t=4$ s时,系统将达到稳定悬浮状态(为保证试验的准确性,预留2s作为悬浮间隙的动态调整时间),因此只分析 $t \in [4, 12]$ s的输出。

悬浮稳定后,在 $5 \text{ s} < t < 9 \text{ s}$ 时输入正弦扰动(扰动频率5 Hz,幅值 $\pm 2 \text{ mm}$),试验结果如图16所示。

由图16b可以看出,当在5s施加扰动时,PID算法控制下的悬浮间隙经过多次被动调整后无法收敛。在扰动激发过程结束前(7.45s)被迫降落,试验过程结束。此时,电流和加速度趋于零。这说明系

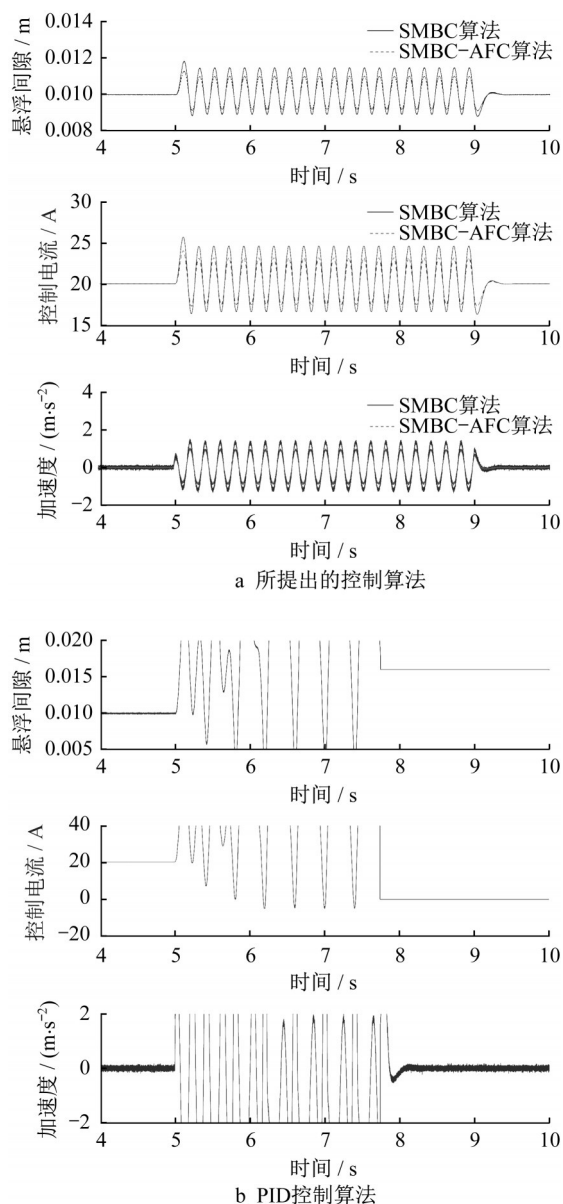


图16 扰动环境下试验结果

Fig.16 Experimental results in disturbed environment

统在处于大扰动环境下PID控制算法的鲁棒性较弱。为了说明所提出算法的有效性,在相同条件下进行了试验,结果如图16a所示。当 $5 \text{ s} < t < 9 \text{ s}$ 时,产生小范围内等幅振动。虽然存在一个极限环,但是当扰动结束时,系统迅速收敛到悬架位置,电磁铁振动得到有效抑制。此外,结合图16a可以看出,带加速度反馈的SMBC-AFC算法比SMBC算法具有更强的鲁棒性。

5 结语

针对动态悬浮过程中外部振动激励问题,以电

流控制最小悬浮单元为基础,提出了一种带加速度补偿的滑模控制算法。基于指数趋近律设计相关滑模控制算法,并通过稳定性分析确定滑模参数可调范围。此外,针对RBF神经网络的自学习功能,提出了AFC算法作为SMBC算法的补充,并对控制系统的几种典型工况进行试验分析,验证其有效性。结果表明,SMBC-AFC算法可提高系统在复杂条件下的鲁棒性,大大减少系统的抖振现象,同时降低浮充初期电流峰值,提高了设备的安全性。然而,当SMBC算法应用于其他非线性系统时,需要根据实际模型进行稳定性分析,从而确定控制参数。另外,需要结合模型阶数和神经元个数来确定AFC算法的网络结构。

作者贡献声明:

陈琛:构建模型、设计算法及撰写论文。

徐俊起:提供研究思路及搭建硬件平台。

林国斌:技术指导及论文审定。

荣立军:试验平台信号通信。

孙友刚:稳定性分析。

参考文献:

- [1] 吴祥明. 磁浮列车[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.
- WU Xiangming. Maglev train [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2003.
- [2] LEE H W, KIM K C, LEE J. Review of maglev train technologies [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42 (7): 1917.
- [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.
- XU Fei, LUO Shihui, DENG Zigang. Study on key technologies and whole speed range application of maglev rail transport [J]. Journal of China Railway Society, 2019, 41 (3): 40.
- [4] 龙志强, 郝阿明, 常文森. 考虑轨道周期性不平顺的磁浮列车悬浮控制系统设计[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(2): 84.
- LONG Zhiqiang, HAO Aming, CHANG Wensen. Suspension controller design of maglev train considering the rail track periodical irregularity [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25(2): 84.
- [5] 张文跃, 佟来生, 朱跃欧, 等. 磁浮列车悬浮系统的反步控制方法及实验研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(4): 1563.
- ZHANG Wenyue, TONG Laisheng, ZHU Yue'ou, et al. Back-stepping control and experimental study of maglev train suspension system [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(4): 1563.
- [6] 敖建安, 魏高恒, 马卫华, 等. 轨道精度对中低速磁浮列车-轨排-桥梁动力作用影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17 (11): 2738.
- AO Jian'an, WEI Gaocheng, MA Weihua, et al. Influence of geometry accuracy of track structure on dynamic performance of the coupled medium-low speed maglev train-rail-bridge system [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(11): 2738.
- [7] KONG E, SONG J S, KANG B B, et al. Dynamic response and robust control of coupled maglev vehicle and guideway system [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(25): 6237.
- [8] WAI R J, LEE J D. Robust levitation control for linear maglev rail system using fuzzy neural network [J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2009, 17(1): 4.
- [9] WAI R J, LEE J D, CHUANG K L. Real-time PID control strategy for maglev transportation system via particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 629.
- [10] 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.
- 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.
- [11] 王军晓, 陈林杰, 俞立. 基于等价输入干扰滑模观测器的磁悬浮球系统模型预测控制[J]. 控制理论与应用, 2021, 38 (1): 137.
- WANG Junxiao, CHEN Linjie, YU Li. Model predictive control for magnetic levitation ball system based on equivalent input disturbance sliding mode observer [J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(1): 137.
- [12] CHEN Chen, XU Junqi, JI Wen, et al. Sliding mode robust adaptive control of maglev vehicle's nonlinear suspension system based on flexible track: design and experiment [J]. IEEE Access, 2019, 7: 41874.
- [13] ZHANG L L, ZHANG Z Z, HUANG L H. Double Hopf bifurcation of time-delayed feedback control for maglev system [J]. Nonlinear Dynamics, 2012, 60(3): 961.
- [14] SU Xiaojie, YANG Xiaozhan, SHI Peng, et al. Fuzzy control of nonlinear electromagnetic suspension systems [J]. Mechatronics, 2014, 24 (4): 328.
- [15] 王辉, 钟晓波, 沈钢. 一种新型磁悬浮线路设计方案及悬浮控制方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(7): 1112.
- WANG Hui, ZHONG Xiaobo, SHEN Gang. A new maglev line system design and control strategy [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(7): 1112.
- [16] CHEN Chen, XU Junqi, LIN Guobin, et al. Fuzzy adaptive control particle swarm optimization based on T-S fuzzy model of maglev vehicle suspension system [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(1): 43.
- [17] 张国山, 李现磊. 一种滑模控制新型幂次趋近律的设计与分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(11): 1112.
- ZHANG Guoshan, LI Xianlei. Design and analysis of a new power reaching law for sliding mode control [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(11): 1112.