



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114312339 B

(45) 授权公告日 2025. 07. 22

(21) 申请号 202011058051.1

(22) 申请日 2020.09.30

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 114312339 A

(43) 申请公布日 2022.04.12

(73) 专利权人 香港理工大学
地址 中国香港九龙

(72) 发明人 倪一清 王素梅 陆洋

(74) 专利代理机构 北京世峰知识产权代理有限
公司 11713
专利代理师 卓霖 许向彤

(51) Int. Cl.
B60L 13/06 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 212289523 U, 2021.01.05

姜斌.《模糊控制在悬浮系统中的应用》.中国优秀硕士学位论文全文数据库.2011,(第2011年第S2期期),正文第3、50-52页.

审查员 满子淳

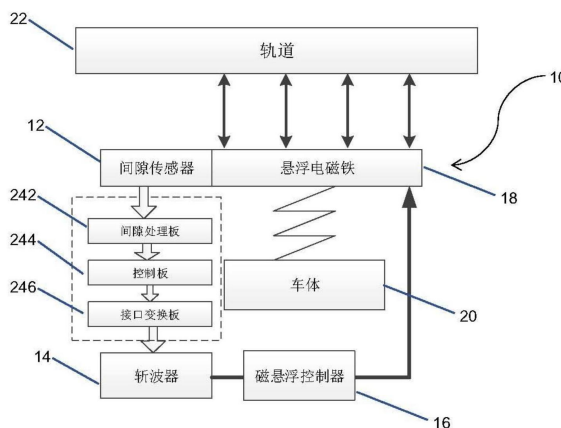
权利要求书3页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

磁悬浮控制系统及控制方法

(57) 摘要

公开了一种磁悬浮控制系统以及控制方法。所述磁悬浮控制系统包括间隙传感器、斩波器、磁悬浮控制器和悬浮电磁铁,所述间隙传感器通过斩波器连接至所述磁悬浮控制器,所述悬浮电磁铁通过外围硬件连接至磁悬浮控制器,所述间隙传感器安装在所述悬浮电磁铁上。所述磁悬浮控制器包括抗饱和悬浮控制器。



1. 一种磁悬浮控制系统,

所述磁悬浮控制系统包括间隙传感器、斩波器、磁悬浮控制器和悬浮电磁铁,所述间隙传感器通过斩波器连接至所述磁悬浮控制器,所述悬浮电磁铁通过外围硬件连接至所述磁悬浮控制器,所述间隙传感器安装在所述悬浮电磁铁上,

其特征在于,所述磁悬浮控制器包括抗饱和悬浮控制器,

其中,所述抗饱和悬浮控制器是基于误差系统 e 和磁浮数学模型,根据以下控制器模型来控制控制量 $u(t)$:

$$u(t) = k_p \arctan(e) + k_d \arctan(\dot{e}) + mg$$

其中,误差系统 e 是实际悬浮间隙和理想悬浮间距之间的差值, m 为列车质量, g 为重力加速度, mg 为名义悬浮重量,同时,电磁铁线圈所需要的电流为:

$$i(t) = \sqrt{\frac{z^2(k_p \arctan(e) + k_d \arctan(\dot{e}) + mg)}{k}}$$

其中, z 是悬浮间距, k_p, k_d 的取值需满足:

$$k_p + k_d \leq \frac{2(F_{\max} - mg)}{\pi}$$

$$k_p + k_d \leq \frac{2mg}{\pi}$$

其中, F_{\max} 是最大电磁吸力。

2. 根据权利要求1所述的磁悬浮控制系统,其中,所述磁悬浮控制器还包括RBF增强控制项。

3. 根据权利要求2所述的磁悬浮控制系统,其中,所述磁悬浮控制器是根据以下控制器模型来执行的:

$$u_{\text{all}}(t) = u(t) + U(t)$$

其中, $u_{\text{all}}(t)$ 是总的控制量, $u(t)$ 是饱和悬浮控制器的控制量, $U(t)$ 是RBF增强控制项的控制量,

$$U(t) = w \cdot R^T = \sum_{i=1}^M w_i R_i(X)$$

其中,输出层的网络权矩阵为 $w = [w_1, w_2, \dots, w_M]$,

$$R_j(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2\sigma_j^2}\right), j = 1, 2, \dots, M$$

其中, $R_j(x)$ 为隐含层第 j 个节点的输出, $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为网络的输入向量,

$$C = [C_1, \dots, C_M] = R_j \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & \dots & C_{nM} \end{bmatrix}$$

为隐含层神经元高斯基函数中心点的坐标矩阵, $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M]$ 为高斯基函数的宽度矢量, $\sigma_j (j=1, 2, \dots, M)$ 是第 j 个隐藏层神经元的宽度, N 为隐含层节点的数量。

4. 根据权利要求1所述的磁悬浮控制系统,其中,所述控制量 $u(t)$ 为电磁吸力,即, $u(t) = F_m$ 。

5. 根据权利要求1所述的磁悬浮控制系统,其中,所述间隙传感器通过间隙处理板、控制板和接口转换板连接所述斩波器。

6. 根据权利要求1所述的磁悬浮控制系统,其中,所述磁悬浮控制器包括计算机硬件和算法软件,用于获取输入的设定的悬浮系统物理参数,以及实时获取轨道和车体间的间隙数据并输出控制信号。

7. 一种用于磁悬浮列车的磁悬浮控制方法,所述方法包括:

为磁悬浮列车提供磁悬浮控制系统,所述磁悬浮控制系统包括间隙传感器、斩波器、磁悬浮控制器和悬浮电磁铁,所述间隙传感器通过斩波器连接至所述磁悬浮控制器,所述磁悬浮控制器连接至计算机设备,所述悬浮电磁铁通过外围硬件连接至磁悬浮控制器,所述间隙传感器安装在所述悬浮电磁铁上;

使用间隙传感器实时测量采集悬浮间距数据;

将所述悬浮间距数据进行模数转化和滤波调制;

通过通信线路将所述悬浮间距数据传递给连接至磁悬浮控制器的计算机设备;

使得承载磁悬浮控制器的计算机设备将磁悬浮控制器所得出的控制量输出至外围硬件,从而驱动悬浮电磁铁工作,将列车悬浮起来;

其特征在于所述磁悬浮控制器包括抗饱和悬浮控制器,

其中,所述抗饱和悬浮控制器是基于误差系统 e 和磁浮数学模型,根据以下控制器模型来控制控制量 $u(t)$:

$$u(t) = k_p \arctan(e) + k_d \arctan(\dot{e}) + mg$$

其中,误差系统 e 是实际悬浮间隙和理想悬浮间距之间的差值, m 为列车质量, g 为重力加速度, mg 为名义悬浮重量,同时,电磁铁线圈所需要的电流为:

$$i(t) = \sqrt{\frac{z^2(k_p \arctan(e) + k_d \arctan(\dot{e}) + mg)}{k}}$$

其中, z 是悬浮间距, k_p, k_d 的取值需满足:

$$k_p + k_d \leq \frac{2(F_{max} - mg)}{\pi}$$

$$k_p + k_d \leq \frac{2mg}{\pi}$$

其中, F_{max} 是最大电磁吸力。

8. 根据权利要求7所述的磁悬浮控制方法,其中,所述磁悬浮控制器还包括RBF增强控制项。

9. 根据权利要求8所述的磁悬浮控制方法,其中,所述磁悬浮控制器是根据以下控制器模型来执行的:

$$u_{all}(t) = u(t) + U(t)$$

其中, $u_{all}(t)$ 是总的控制量, $u(t)$ 是饱和悬浮控制器的控制量, $U(t)$ 是RBF增强控制项的控制量,

$$U(t) = w \cdot R^T = \sum_{i=1}^M w_i R_i(X)$$

其中,输出层的网络权矩阵为 $w = [w_1, w_2, \dots, w_M]$,

$$R_j(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2\sigma_j^2}\right), j = 1, 2, \dots, M$$

式中, $R_j(x)$ 为隐含层第 j 个节点的输出, $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为网络的输入向量,

$$C = [C_1, \dots, C_M] = R_j \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & \dots & C_{nM} \end{bmatrix}$$

为隐含层神经元高斯基函数中心点的坐标矩阵, $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M]$ 为高斯基函数的宽度矢量, $\sigma_j (j=1, 2, \dots, M)$ 是第 j 个隐藏层神经元的宽度, N 为隐含层节点的数量。

10. 根据权利要求7所述的磁悬浮控制方法,其中,所述控制量 $u(t)$ 为电磁吸力,即, $u(t) = F_m$ 。

磁悬浮控制系统及控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及磁悬浮列车,具体地,涉及EMS磁悬浮列车的新型悬浮控制系统及控制方法。

背景技术

[0002] 磁悬浮列车是一种具有非接触式电磁悬浮,引导和驱动系统的现代运输方式。它依靠电磁吸引或斥力将火车悬挂在空中,以实现火车与轨道之间没有机械接触,并由直线电动机驱动。磁悬浮列车由于其速度快,能耗低,乘坐舒适且噪音低而成为理想的交通工具。目前按照磁浮车辆采用的悬浮原理及方式的不同,磁悬浮列车一般划分为两大类,一类为电动悬浮(Electrodynamic Suspension),简称EDS型;一类为电磁悬浮型(Electromagnetic Suspension),简称EMS型。EDS型磁浮系统利用电磁排斥力使车辆在轨道上方悬浮,而EMS型磁浮系统则利用位于轨道下方的电磁铁产生的吸引力将车辆抬起从而保证和轨道不接触。EDS型磁浮系统不需要施加控制即可稳定悬浮,而EMS型磁浮系统需要施加主动控制来保证系统稳定悬浮。目前商业化运行的,都是EMS型磁悬浮列车。

[0003] 对于EMS磁悬浮列车来说,悬浮系统是磁悬浮列车的关键和核心。但是,悬浮系统具有很强的非线性和开环不稳定性。此外,系统参数具有不确定性,并且系统在运行过程中会遭受外部干扰。因此,对高性能的悬浮控制器的设计提出了很高的挑战。

[0004] EMS型磁悬浮列车的悬浮系统现在面临的最紧迫的问题是模型的不确定性(如风荷载,轨道不平顺性,乘客数量等)和执行器输出饱和。目前,大多数磁浮车辆悬浮控制器是线性PID控制器。不能保证控制器输出一直在饱和范围内。当控制器输出超过饱和范围,执行器无法给出所需控制量,系统控制性能将降低,系统稳定性下降甚至失去稳定性。

发明内容

[0005] 本发明公开了磁浮列车的磁悬浮控制系统及控制方法,与现有技术相比,本发明中的控制器可以确保控制输出不超过饱和范围,静态误差小,抗干扰性强,有广阔的应用价值与商业推广价值。

[0006] 根据本发明的一方面,提供了一种磁悬浮控制系统,所述磁悬浮控制系统包括间隙传感器、斩波器、磁悬浮控制器和悬浮电磁铁,所述间隙传感器通过斩波器连接至所述磁悬浮控制器,所述悬浮电磁铁通过外围硬件连接至磁悬浮控制器,所述间隙传感器安装在所述悬浮电磁铁上。其特征在于,所述磁悬浮控制器包括抗饱和悬浮控制器。

[0007] 根据本发明的另一方面,提供了一种用于磁悬浮列车的磁悬浮控制方法。所述方法包括:为磁悬浮列车提供磁悬浮控制系统,所述磁悬浮控制系统包括间隙传感器、斩波器、磁悬浮控制器和悬浮电磁铁,所述间隙传感器通过斩波器连接至所述磁悬浮控制器,所述磁悬浮控制器连接至计算机设备,所述悬浮电磁铁通过外围硬件连接至磁悬浮控制器,所述间隙传感器安装在所述悬浮电磁铁上;使用间隙传感器实时测量采集悬浮间距数据;将所述悬浮间距数据进行模数转化和滤波调制;通过通信线路将所述悬浮间距数据传递给

连接至磁悬浮控制器的计算机设备；使得承载磁悬浮控制器的计算机设备将磁悬浮控制器所得出的控制量输出至外围硬件，从而驱动悬浮电磁铁工作，将列车悬浮起来。所述磁悬浮控制器包括抗饱和和悬浮控制器。

附图说明

[0008] 为了更清楚地说明本申请实施例中的技术方案，下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本申请中记载的一些实施例，而对于本领域或普通技术人员来讲并非限制。

[0009] 图1为本发明一种EMS磁浮列车悬浮控制器悬浮系统结构示意图；

[0010] 图2为本发明一种EMS磁浮列车悬浮控制器控制流程示意图；

[0011] 图3为本发明一种EMS磁浮列车悬浮控制动力学模型示意图；

[0012] 图4为本发明一种EMS磁浮列车悬浮控制器控制系统示意图；

[0013] 图5为本发明一种EMS磁浮列车悬浮控制器RBF神经网络结构示意图；

[0014] 图6为本发明一种EMS磁浮列车悬浮控制器RBF神经元模型结构示意图。

具体实施方式

[0015] 磁悬浮控制系统

[0016] 图1示出了根据本发明的一个实施例的磁悬浮控制系统10。如图所示，磁悬浮控制系统10包括间隙传感器12、斩波器14、磁悬浮控制器16和悬浮电磁铁18。间隙传感器12通过斩波器14连接至磁悬浮控制器16。悬浮电磁铁18通过外围硬件连接至磁悬浮控制器16。间隙传感器12安装在所述悬浮电磁铁18上。间隙传感器12通过间隙处理板242、控制板244和接口转换板246连接斩波器14。磁悬浮控制器16包括计算机硬件和算法软件。编制磁悬浮控制器16的算法软件，存储于计算机硬件中。悬浮电磁铁18安装在车体20上，使得车体20悬浮在轨道22上。

[0017] 磁悬浮控制器16可以包括任何适合的控制器，例如微分控制器，积分控制器等等。在一个实施例中，磁悬浮控制器16包括抗饱和和悬浮控制器。抗饱和和悬浮控制器是基于误差系统 e 和磁浮最小模型，根据以下控制器模型来执行的：

$$[0018] \quad u(t) = k_p \arctan(e) + k_d \arctan(\dot{e}) + mg$$

[0019] 其中，误差系统 e 是实际悬浮间隙和理想悬浮间距之间的差值， $u(t)$ 为控制量，其是时间 t 的变量，是指控制器输出值，磁悬浮列车以此输出值为基础调整实际悬浮间隙更加接近理想间隙； m 为列车质量， g 为重力加速度， mg 为名义悬浮重量。控制量 $u(t)$ 可以是任何合适的控制量。根据本发明的一个实施例，所述控制量 $u(t)$ 为电磁吸力，即， $u(t) = F_m$ 。

[0020] 同时，电磁铁线圈所需要的电流为：

$$[0021] \quad i(t) = \sqrt{\frac{z^2(k_p \arctan(e) + k_d \arctan(\dot{e}) + mg)}{k}}$$

[0022] 其中， z 是悬浮间距， k_p, k_d 的取值需满足：

$$[0023] \quad k_p + k_d \leq \frac{2(F_{max} - mg)}{\pi}$$

$$[0024] \quad k_p + k_d \leq \frac{2mg}{\pi}$$

[0025] 其中, F_{\max} 是最大电磁吸力。将在后文详述对于上述控制器模型的推导。

[0026] 磁浮列车在行驶中不可避免的会遭受各种其他因素干扰,如:风力、轨道变形、信号传输反馈延时等,为了进一步提升上述抗饱和悬浮控制器的性能,还可以对上述控制量引入控制补偿项。也即,

$$[0027] \quad u_{\text{all}}(t) = u(t) + U(t)$$

[0028] 其中, $u_{\text{all}}(t)$ 是总的控制量, $u(t)$ 是抗饱和悬浮控制器的控制量, $U(t)$ 是补偿项。

[0029] 根据本发明的一个实施例,控制补偿项可以是基于RBF神经网络的RBF增强控制项。在该实施例中,当磁悬浮控制器16工作时,负责执行神经网络逼近算法的运行、获取输入的设定的悬浮系统物理参数,以及实时获取轨道和车体间的间隙数据并计算和控制输出控制信号。

[0030] 对于RBF增强控制项,补偿项 $U(t)$ 为:

$$[0031] \quad U(t) = w \cdot R^T = \sum_{i=1}^M w_i R_i(X)$$

[0032] 其中,输出层的网络权矩阵为 $w = [w_1, w_2, \dots, w_M]$ 。

$$[0033] \quad R_j(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2\sigma_j^2}\right), j = 1, 2, \dots, M$$

[0034] 式中, $R_j(x)$ 为隐含层第 j 个节点的输出, $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为网络的输入向量,

$$C = [C_1, \dots, C_M] = R_j \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & \dots & C_{nM} \end{bmatrix}$$

为隐含层神经元高斯基函数中心点的坐标矩

阵, $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M]$ 为高斯基函数的宽度矢量, σ_j ($j = 1, 2, \dots, M$) 是第 j 个隐藏层神经元的宽度, N 为隐含层节点的数量。

[0035] 本实施例的工作原理为:间隙传感器12实时、高速、不间断地测量采集悬浮间距数据,经模数转化滤波调制后,通过通信线路,将悬浮间距数据传递给承载磁悬浮控制器16的计算机设备。磁悬浮控制器16的计算机设备将磁悬浮控制器16所得出的控制量输出至外围硬件,驱动悬浮电磁铁18工作,将列车车体20悬浮起来。悬浮间距与目标位置的误差通过磁悬浮控制器16计算得到控制输出量。随着在间隙传感器12、磁悬浮控制器16的计算机设备、悬浮电磁铁18的外围硬件的实时不间断的工作,列车车体20将会在有限时间内移动到目标位置,并保持在该位置误差限制范围内,达到稳定可靠的悬浮控制效果。

[0036] **磁悬浮控制方法**

[0037] 基于上述磁悬浮控制系统,本发明还提出了相应的磁悬浮控制方法。根据一个实施例,用于磁悬浮列车的磁悬浮控制方法可包括以下步骤:

[0038] 1、为磁悬浮列车提供磁悬浮控制系统,所述磁悬浮控制系统包括间隙传感器、斩波器、磁悬浮控制器和悬浮电磁铁,所述间隙传感器通过斩波器连接至所述磁悬浮控制器,所述磁悬浮控制器连接至计算机设备,所述悬浮电磁铁通过外围硬件连接至磁悬浮控制

器,所述间隙传感器安装在所述悬浮电磁铁上。

[0039] 2、使用间隙传感器实时测量采集悬浮间距数据。

[0040] 3、将所述悬浮间距数据进行模数转化和滤波调制。

[0041] 4、通过通信线路将所述悬浮间距数据传递给连接至磁悬浮控制器的计算机设备。

[0042] 5、使得承载磁悬浮控制器的计算机设备将磁悬浮控制器所得出的控制量输出至外围硬件,从而驱动悬浮电磁铁工作,将列车悬浮起来。

[0043] 上述步骤中的磁悬浮控制器可根据前述磁悬浮控制系统进行配置。

[0044] 构建本发明抗饱和磁悬浮控制器模型以及神经网络的RBF增强控制项

[0045] 为深入理解前述磁悬浮控制系统及控制方法,以下接合图2-图6简要说明构建本发明抗饱和磁悬浮控制器模型以及神经网络的RBF增强控制项的过程和方法。

[0046] 图2示出了构建本发明的上述抗饱和悬浮控制器模型以及神经网络的RBF增强控制项的过程和方法。该方法包括步骤S1-S4。在步骤S1,建立磁浮列车悬浮控制的动力学模型,设计控制器并分析系统的稳定性,引入RBF监督控制。在步骤S2,在磁悬浮控制器中输入设定的悬浮系统物理参数。在步骤S3,使得磁悬浮控制器实时获取轨道和车体间的间隙数据后输出控制信号。在步骤S4,使得悬浮系统的外围硬件接收控制信号,驱动悬浮电磁铁在有限时间内移动到目标位置,并保持在该位置误差限制范围内。

[0047] 结合图3,图中的 $z(t)$ 为悬浮间隙,悬浮间隙有一个设计的理想值,车辆在运行过程实际悬浮间隙在理想值附近波动,才能保证列车平稳运行。对国内大部分磁悬浮车而言,车辆与轨道之间的理想悬浮间隙,也即目标悬浮间距,通常为8mm。步骤S1中的最终控制器模型表示为:对于目标悬浮间距是定值的,基于误差系统 e (也即实际悬浮间隙和理想悬浮间隙之间的差值)和磁浮最小模型,提出抗饱和悬浮控制器。此处饱和是指积分饱和。所谓积分饱和就是指系统存在一个方向的偏差,控制器的输出由于积分作用的不断累加而扩大,从而导致控制器输出不断增大超出正常范围进入饱和区。当系统出现反向的偏差时,需要首先从饱和区退出,而不能对反向的偏差进行快速的响应。抗饱和即指避免上述情况发生。根据一个实施例,抗饱和悬浮控制器如下所示:

$$[0048] \quad u(t) = k_p \arctan(e) + k_d \arctan(\dot{e}) + mg$$

[0049] 其中, $u(t)$ 表示控制量,其是时间 t 的变量,是指控制器输出值,列车以此输出值为基础调整实际悬浮间隙更加接近理想间隙; g 为重力加速度, mg 为名义悬浮重量。同时,电磁铁线圈所需要的电流为:

$$[0050] \quad i(t) = \sqrt{\frac{z^2(k_p \arctan(e) + k_d \arctan(\dot{e}) + mg)}{k}}$$

[0051] 其中, z 是悬浮间距,为了保证控制器始终提供大于0的力,并且工作在幅值饱和以内, k_p, k_d 的取值需满足:

$$[0052] \quad k_p + k_d \leq \frac{2(F_{max} - mg)}{\pi}$$

$$[0053] \quad k_p + k_d \leq \frac{2mg}{\pi}$$

[0054] 上述最终控制器模型构建方法包括:S11、建立磁浮列车悬浮控制器数学模型,得

到控制器的控制电流;S12、引入RBF神经网络。

[0055] 在上述步骤S11中,磁浮列车悬浮控制数学模型表示:在一定范围内,可认为磁浮列车各悬浮控制器相互独立,可以将单点悬浮系统看做最小动力学模型进行控制器设计。如图3所示,单点悬浮系统由单个悬浮电磁铁及线圈、刚性轨道和控制输入组成。图中 N_m 为电磁铁线圈匝数, $z(t)$ 为悬浮间距, A_m 为电磁铁的磁极面积, $F_m(i_m(t), x_m(t))$ 表示电磁吸力, $u_m(t)$ 和 $i_m(t)$ 分别表示电磁铁线圈的电压和电流, mg 为名义悬浮重量。

$$[0056] \quad m\ddot{z} = -\text{sat}_{i_{max}}(F_m) + mg$$

[0057] 其中 z 是悬浮间距, m 是质量, g 是重力加速度 $\text{sat}_{i_{max}}(F_m)$ 定义为:

$$[0058] \quad \text{sat}_{i_{max}}(F_m) = \begin{cases} F_{max}, & F_m > F_{max} \\ F_m, & 0 < F_m < F_{max} \end{cases}$$

[0059] F_{max} 是系统能提供的最大电磁吸力,主要和斩波器提供的最大电流相关。 F_m 表电磁铁产生的吸力,可以表示为:

$$[0060] \quad F_m = \frac{\mu_0 AN^2}{4} \left[\frac{i(t)}{z(t)} \right]^2 = k \left[\frac{i(t)}{z(t)} \right]^2$$

[0061] 其中, $i(t)$ 表示电磁铁线圈的电流; N 为电磁铁线圈匝数; A 为电磁铁的磁极面积, μ_0 为空气磁导率。 $k = \frac{\mu_0 AN^2}{4}$ 。

[0062] 定义电磁吸力为控制量,则 $u(t) = F_m$ 。因为悬浮间距 $z(t)$ 可以通过传感器实时测量,只要 $F_m(t)$ 确定了,系统所需的控制电流 $i(t)$ 就可以通过下式方便的算出:

$$[0063] \quad i(t) = \sqrt{\frac{z^2 F_m}{k}}$$

[0064] 因此,我们既可以将 F_m 也可以将 $i(t)$ 当做待设计的控制输入。控制输入是指:给此值一个限定范围,让其一直处于此范围内,从而避免出现饱和现象。但是将 F_m 作为控制输入时,必须保证单向约束,即 $u(t) = F_m$ 。

[0065] 如果通过适当的控制器能够保证 $u(t)$ 的幅值一直在 $[0, F_{max}]$ 之间,那么 $u(t)$ (也就是 F_m)将永远不会饱和,则 $\text{sat}_{i_{max}}\{\mu(t)\} = \mu(t)$ 。因此饱和的非线性可以通过一个双边约束移除,动力学方程转换为如下所示:

$$[0066] \quad m\ddot{z} = -u(t) + mg, \quad \text{subject } 0 \leq u \leq F_{max} \quad (2)$$

[0067] 此时电磁铁所需要施加的控制电流可由下式方便地计算:

$$[0068] \quad i(t) = \sqrt{\frac{z^2 \mu(t)}{k}}$$

[0069] 提出抗饱和和悬浮控制器如下:

$$[0070] \quad u(t) = k_p \arctan(e) + k_d \arctan(\dot{e}) + mg \quad (3)$$

[0071] 同时,电磁铁线圈所需要的电流为:

$$[0072] \quad i(t) = \sqrt{\frac{z^2 (k_p \arctan(e) + k_d \arctan(\dot{e}) + mg)}{k}}$$

[0073] 其中, z 是悬浮间距, 为了保证所提控制器始终提供大于 0 的力, 并且工作在幅值饱和和以内, k_p, k_d 的取值需满足:

$$[0074] \quad k_p + k_d \leq \frac{2(F_{max} - mg)}{\pi}$$

$$[0075] \quad k_p + k_d \leq \frac{2mg}{\pi}$$

[0076] 磁浮列车的控制目标是让悬浮间距 $z(t)$ 保持在目标悬浮间距, 为了定量描述控制目标, 将误差信号定义为:

$$[0077] \quad e(t) = z(t) - z_d, \quad \dot{e}(t) = \dot{z}(t) - \dot{z}_d, \quad \ddot{e}(t) = \ddot{z}(t) - \ddot{z}_d \quad (4)$$

[0078] 其中 z_d 为目标悬浮间距, \dot{z}_d 和 \ddot{z}_d 是目标悬浮间距的一阶导数和二阶导数。如果 z_d 是定值, 那么 \dot{z}_d 和 \ddot{z}_d 为零。联合 (2) 和 (4), 误差系统 e 可被推导出, 如下:

$$[0079] \quad m\ddot{e} = -u(t) + m(g - \ddot{z}_d), \quad \text{subject } 0 \leq u \leq F_{max} \quad (5)$$

[0080] 为了进行稳定性的证明, 根据所设计的控制器 (3) 和误差系统 (5), 构造一个 Lyapunov 方程:

$$[0081] \quad V = \frac{1}{2}m\dot{z}^2 + k_p \left[e \arctan(e) - \frac{1}{2} \ln(1 + e^2) \right] \quad (6)$$

[0082] 定义一个辅助函数如下:

$$[0083] \quad E_{aux} = 2 \left[e \arctan(e) - \frac{1}{2} \ln(1 + e^2) \right] - \arctan^2(e)$$

[0084] 易得 $E_{aux}(0) = 0$, 关于 e 对 $E_{aux}(e)$ 求导可得:

$$[0085] \quad \dot{E}_{aux}(e) = \frac{e^2}{1+e^2} \arctan(e) \quad (7)$$

[0086] 显然, 当 $e=0$ 时, $\dot{E}_{aux}(e) = 0$ 。从 (7) 明显可以看出当 $e>0$ 时, $\dot{E}_{aux}(e) > 0$; 当 $e<0$ 时, $\dot{E}_{aux}(e) < 0$ 。因此, 结合 $E_{aux}(0) = 0$, 可以得出:

$$[0087] \quad E_{aux}(e) \geq 0, \text{ 即: } 2 \left[e \arctan(e) - \frac{1}{2} \ln(1 + e^2) \right] \geq \arctan^2(e)$$

[0088] 那么公式 (6) 可以转化成:

$$[0089] \quad \begin{aligned} V &= \frac{1}{2}m\dot{z}^2 + k_p \left[e \arctan(e) - \frac{1}{2} \ln(1 + e^2) \right] \\ &\geq \frac{1}{2}me^2 + \frac{1}{2}k_p \arctan^2(e) \end{aligned}$$

$$[0090] \quad \geq 0$$

[0091] 当且仅当 $e=0$ 且 $\dot{e} = 0$ 时, $V=0$; 因此 V 为正定函数。

[0092] 对 V 的等式两边关于时间求导, 得:

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= m\dot{z}\ddot{z} + k_p \left[\frac{\dot{e}\ddot{e}}{1+e^2} + \dot{e} \arctan(e) - \frac{\dot{e}\ddot{e}}{1+e^2} \right] \\
&= \dot{z}[-\mu(t) + mg] + k_p \dot{e} \arctan(e) \\
[0093] \quad &= \dot{e}[-k_p \arctan(e) - k_d \arctan(\dot{e}) + k_p \arctan(e)] \\
&= -k_d \dot{e} \arctan(\dot{e})
\end{aligned}$$

[0094] 因为 $\dot{e} \arctan(e) \geq 0$, $k_d \in \mathbb{R}^+$, 所以 $V \leq 0$, 因此磁浮闭环系统是 Lyapunov 稳定, 并且

$$[0095] \quad V(t) \in L^\infty \Rightarrow z, e, \dot{z}, \dot{e} \in L^\infty$$

[0096] 为了进一步证明误差的收敛性, 定义集合如下

$$[0097] \quad S \triangleq \{(e, \dot{e}) | V = 0\}$$

[0098] 然后定义 M 为 S 中包含的最大不变集。在 M 集合中可以有如下结论:

$$[0099] \quad V = 0 \Rightarrow \dot{z} = 0, \dot{e} = 0, \ddot{z} = 0$$

[0100] 结合前述, 有:

$$\begin{aligned}
[0101] \quad & -u + mg = 0, \quad = k_p e + k_d \dot{e} + mg \\
& \Rightarrow k_p e + k_d \dot{e} = 0 \Rightarrow e = 0
\end{aligned}$$

[0102] 因此, 可以得出 M 只包含平衡点 $[e \quad \dot{e}]^T = [0 \quad 0]^T$ 。因此, 根据 LaSalle's invariance theorem, 可得

$$[0103] \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \|[e \quad \dot{e}]^T\| = 0$$

[0104] 因此, 闭环系统的渐进稳定性得证。

[0105] 进一步地, 所述步骤 S12 中, 所提抗饱和悬浮控制器的设计和稳定性分析都是在没有干扰的假设下进行, 然而磁浮列车在行驶中不可避免的会遭受各种其他因素干扰, 如: 风力, 轨道变形, 信号传输反馈延时等, 为了进一步提升所提的抗饱和悬浮控制器的性能, 基于 RBF 神经网络提出一个控制补偿项。

[0106] 人工神经网络有很多种结构, 其中 RBF 神经网络由于具有良好的泛化能力, 网络结构简单, 避免冗长的计算而受到控制系统的关注。本文选用 RBF 神经网络设计监督控制结构。RBF 神经网络在系统具有较大不确定性时, 能有效地提高控制器的性能。如图 5 所示, RBF 神经网络是具有三层神经元的前馈网络。输入层信号为 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 、隐藏层信号为 $R = [R_1, R_2, \dots, R_M]$, $R_j (j=1, 2, \dots, M)$ 激活函数通常采用高斯基函数, 它将随机输入向量 $X \in \mathbb{R}^n$ (X 是一个输入样本集) 定义为:

$$[0107] \quad R_j(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2\sigma_j^2}\right), j = 1, 2, \dots, M$$

[0108] 式中, $R_j(x)$ 为隐含层第 j 个节点的输出, $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为网络的输入向量,

$$C = [C_1, \dots, C_M] = R_j \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & \dots & C_{nM} \end{bmatrix} \text{为隐含层神经元高斯基函数中心点的坐标矩}$$

阵, $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M]$ 为高斯基函数的宽度矢量, σ_j ($j=1, 2, \dots, M$) 是第 j 个隐藏层神经元的宽度, N 为隐含层节点的数量。输出层的网络权矩阵为 $w = [w_1, w_2, \dots, w_M]$, 得到的实际输出信号为:

$$[0109] \quad U(t) = w \cdot R^T = \sum_{i=1}^M w_i R_i(X)$$

[0110] 含高斯核函数的隐含层神经元模型如图4所示。

[0111] RBF神经网络补偿控制是期望在控制过程中用在线学习后的神经网络输出控制量 $U(t)$ 逐步取代抗饱和和悬浮控制器 $u(t)$ 。

[0112] 总体的控制器 $u_{all}(t)$ 设计如下:

$$[0113] \quad u_{all}(t) = u(t) + U(t)$$

[0114] 控制器结构示意图如图4所示。

[0115] 根据最小均方根 (Least Mean Square, LMS) 算法,

$$[0116] \quad E = \frac{1}{2} \Delta u^2 = \frac{1}{2} (U - u_{all})^2$$

[0117] 根据随机梯度下降法, 权值按照以下方式调节

$$[0118] \quad \Delta w_j(N) = -\eta \frac{\partial E(t)}{\partial w_j} = \eta (u_{all}(t) - U(t)) R_j(t)$$

$$[0119] \quad w(N) = w(N-1) + \Delta w(N) + (\alpha(N-1) - \alpha(N-2))$$

[0120] 其中, $\Delta w_j(N)$ 为 w_j 的迭代修正量, $\eta \in [0, 1]$ 为学习速率, $\alpha \in [0, 1]$ 为动量因子。本实施例通过悬浮系统的软硬件配合完成实现。

[0121] 以上虽然参照示例性实施例对本发明进行了描述, 但是上述实施例只为说明本发明的技术构思及特点, 并不能以此限制本发明的保护范围。凡根据本发明精神实质所做的任何等效变型或修改, 都应涵盖在本发明的保护范围之内。

[0122] 应当理解, 本领域的普通技术人员无需创造性劳动就可以根据本发明的构思作出对参数的诸多修改和变化。因此, 凡本技术领域技术人员依本发明的构思在现有技术的基础上通过逻辑分析、推理或者有限的实验可以得到的技术方案, 皆应在由权利要求书所确定的保护范围内。

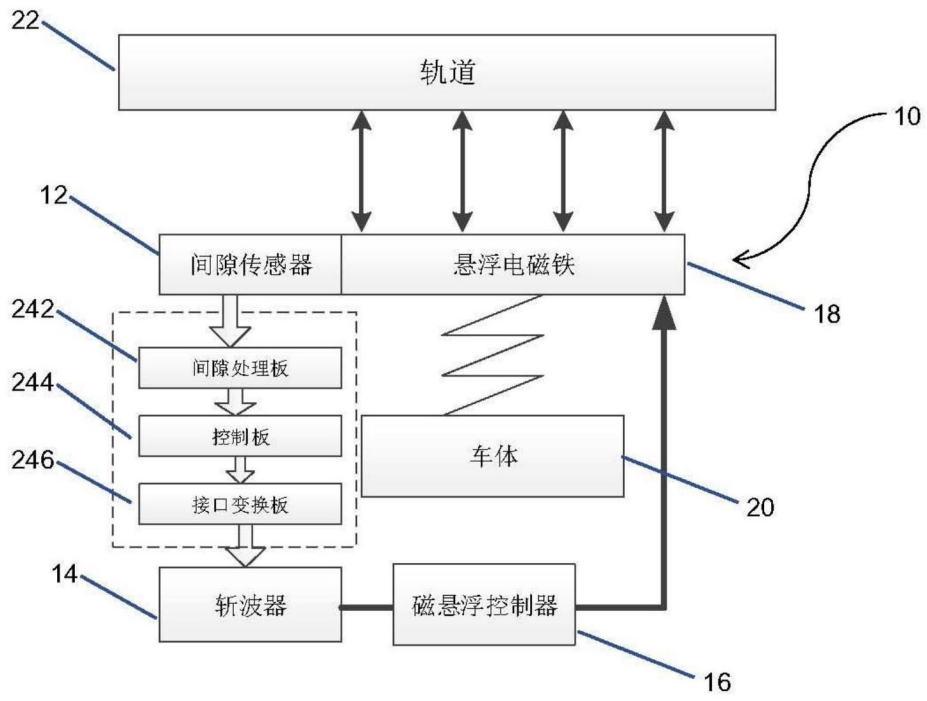


图1

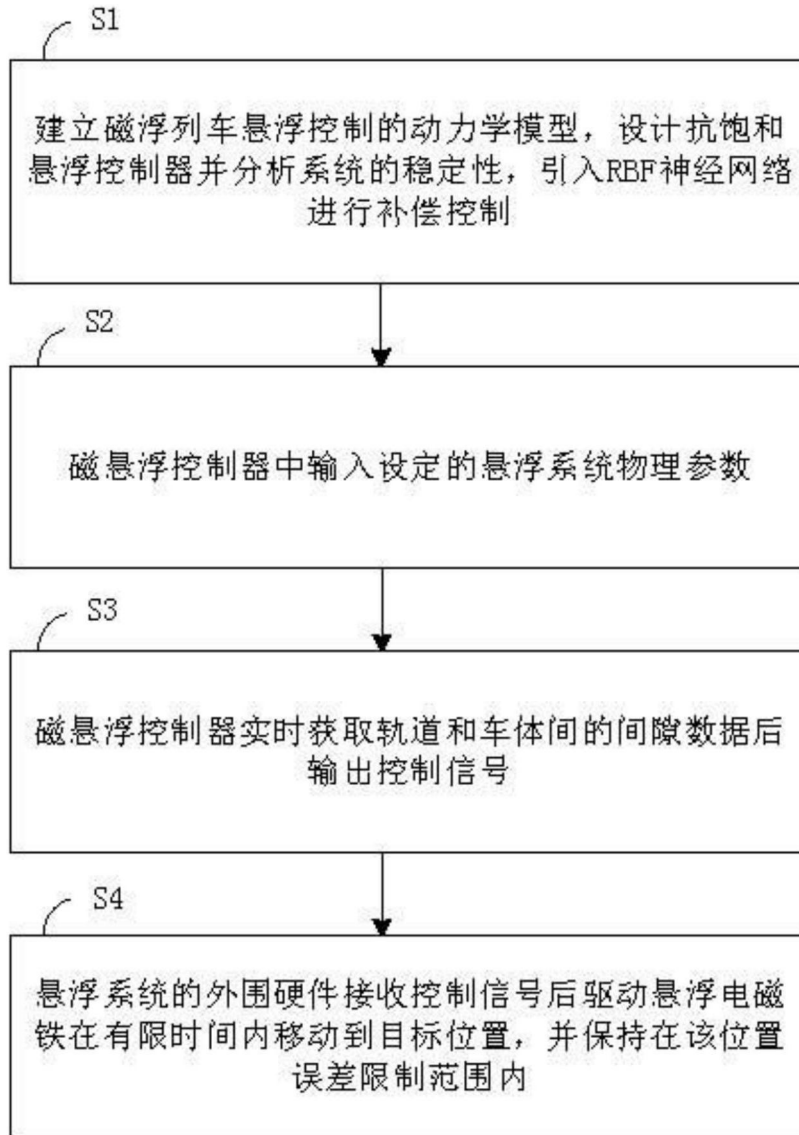


图2

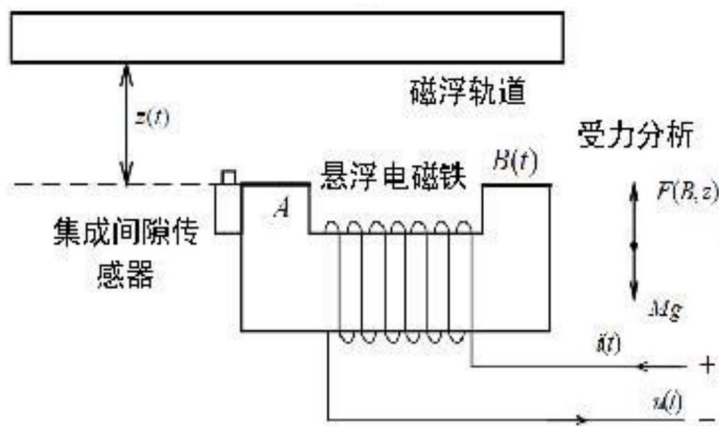


图3

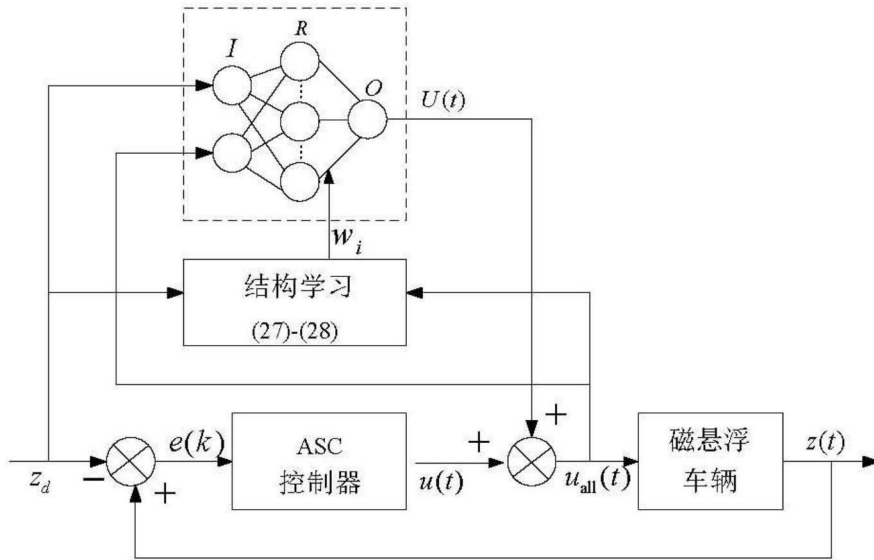


图4

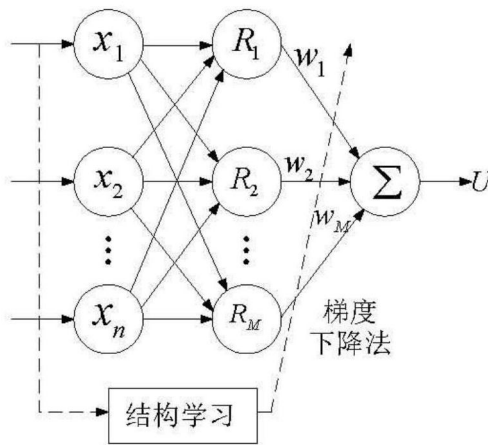


图5

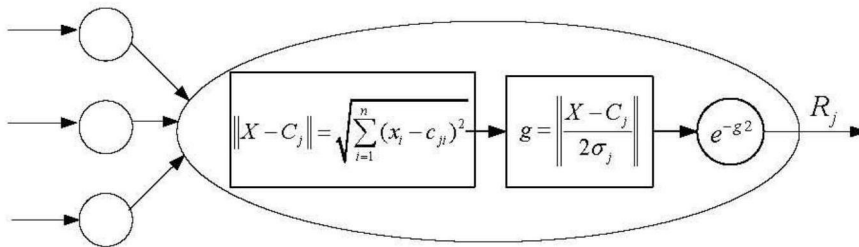


图6