

负载扰动下磁浮车辆多点悬浮建模与控制

徐俊起¹, 林国斌¹, 陈 琛^{1,2,3}, 荣立军¹, 吉 文¹

(1. 同济大学磁浮交通工程技术研究中心, 上海 201804; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;

3. 同济大学交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要: 以同济大学磁浮交通工程技术研究中心研制的低速磁浮车辆为研究对象, 研究非线性时变扰动下多点悬浮的控制算法设计及优化问题。建立多点悬浮的非线性数学模型, 并基于交叉耦合控制算法对各个悬浮点的输出误差进行补偿。与单点比例-积分-微分(PID)控制算法的比较结果表明, 基于交叉耦合的反馈控制算法, 能够克服以往基于假设完全解耦设计出的控制算法的不足, 具有较高的控制精度和较强的鲁棒性。最后, 通过试验验证负载扰动下交叉耦合反馈控制算法的有效性。

关键词: 磁浮列车; 多点悬浮; 负载扰动; 交叉耦合

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Modeling and Control of Multi-point Levitation of Maglev Vehicle Under Loading Disturbance

XU Junqi¹, LIN Guobin¹, CHEN Chen^{1,2,3}, RONG Lijun¹, JI Wen¹

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

Abstract: Taking the low-speed maglev vehicle in Maglev Transportation Engineering R&D Center of Tongji University as the research object, the design and optimization of control algorithm for multi-point levitation under nonlinear time-varying disturbance is discussed in this paper. Firstly, the nonlinear mathematical model of multi-point levitation is established, and the output errors of each levitation point are compensated based on cross-coupling control algorithm. Compared with the single-point PID control algorithm, the feedback control

algorithm based on cross-coupling can overcome the shortcomings of the previous control algorithm based on the hypothesis of complete decoupling and has high control accuracy and strong robustness. Finally, the effectiveness of the cross-coupling feedback control algorithm is verified by experiments.

Key words: maglev train; multi-point levitation; loading disturbance; cross coupling

自 2003 年上海高速磁浮示范线投入运营以来, 日本、韩国和中国又先后建成了四条中低速磁浮应用线。经过半个多世纪的研发和初期应用, 磁浮交通正逐步进入推广应用阶段。磁浮列车以其独特的无接触悬浮运行特点, 吸引了众多专家学者的关注。车辆悬浮系统的性能是磁浮交通的关键指标, 而这一性能指标最初的悬浮控制技术大多基于单点悬浮系统, 仅仅关注悬浮的稳定性。然而, 随着研究的进行, 越来越多的学者发现, 应该更深入地分析悬浮系统在不同激励扰动下的动态响应品质、系统鲁棒性及抗干扰性等。Kim 等^[1]、Al-Muthairi 等^[2]基于单电磁铁线圈进行控制器设计, 分别提出模糊比例-积分-微分(PID)控制、滑模变结构控制等方法对磁浮车辆进行悬浮控制, 有效提高了单电磁铁线圈悬浮间隙的控制精度, 但是仍未解决参数调试难问题。Chen 等^[3]基于柔性轨道单跨筒支梁的动力学方程和悬浮电磁铁自身的非线性方程以及径向基函数(RBF)网络逼近原理, 设计了磁浮系统的滑模自适应状态反馈控制器, 但是没有考虑实际系统中多点共同支撑悬浮时可能存在的输出不一致问题。陈琛等^[4]建立了轨道分段链式结构的离散形式和轨道

收稿日期: 2020-04-03

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFB1200602)

第一作者: 徐俊起(1977—), 男, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为磁浮车辆悬浮控制及车轨耦合动力学分析。

E-mail: xujunqi@tongji.edu.cn

通信作者: 林国斌(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 工学硕士, 主要研究方向为磁浮列车悬浮控制及牵引控制技术。

E-mail: 12154@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

结构的运动方程,采用虚拟激励法将轨道不平顺产生的随机激励转化为系统输入激励,并将轨道随机高低不平顺作为振动激励源进行车轨振动控制,但是没有对控制算法进行有效优化。封伟^[5]、李奇南等^[6-7]以钢板为例,分析了多个电磁铁协调下悬浮间隙控制的超静定问题,但算法并未得到有效验证。张敏等^[8]基于中低速磁浮列车中电磁铁线圈的连接方式及分布方式,提出一种更为科学的电磁铁连接方式,并与现有系统进行对比,验证该连接方式的优越性。由于交叉耦合系统能够在多体或多轴系统中进行有效的输入输出协同,因此在多电机传动、多体机器人协同配合等领域得到了比较普遍的应用^[9-10]。

基于非线性动力学方程搭建多点系统的悬浮模型,并设计负载扰动下多点悬浮控制算法。首先定义各悬浮点间的误差关系,然后基于交叉耦合控制算法对各悬浮点的输出误差进行补偿,最后针对负载扰动变化进行系统改进。基于Nyquist稳定性判据确定闭环系统的控制参数调节范围,从而在降低调试难度的情况下提高系统悬浮稳定性。

1 悬浮系统模型

由磁浮列车悬浮系统结构可知,每列车厢的悬浮系统由若干个相互独立的悬浮架构成,每个悬浮架由4个悬浮点构成,如图1、2所示。下面首先分析单点悬浮模型,然后对单侧模型进行相应建模。

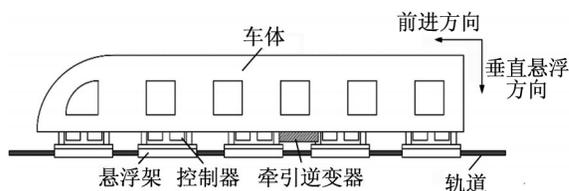


图1 磁浮车辆结构侧视图

Fig. 1 Side view of maglev vehicle structure

1.1 单点悬浮系统模型

以同济大学低速磁浮试验车为例,假定悬浮系统可以进行完全解耦。为便于分析,将悬浮系统假定为单电磁铁控制系统,在忽略耦合作用下进行系统建模。单电磁铁控制系统包括磁浮轨道、电磁铁模块、悬浮控制器、电涡流间隙传感器、斩波器。单电磁铁控制系统如图3所示^[11-13]。

图3中,电磁力 $F(B, z)$ 由悬浮电磁铁产生, $z(t)$ 是电磁铁和磁浮轨道之间的间隙, $i(t)$ 是流过电磁铁线圈的电流, $u(t)$ 是电磁铁线圈两端的激励电压, $B(t)$ 是悬浮电磁铁表面的磁通密度, A 是电磁铁的磁

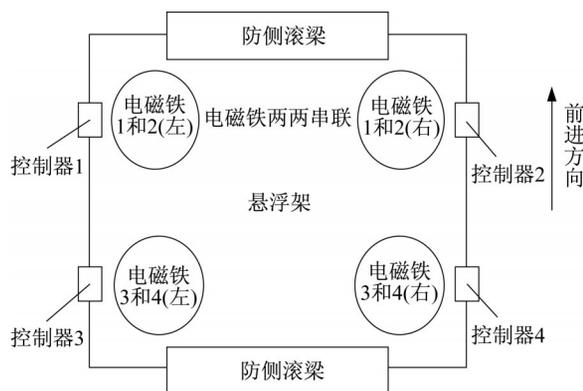


图2 磁浮车辆悬浮架俯视图

Fig. 2 Overlooking sketch of levitation frame of maglev vehicle

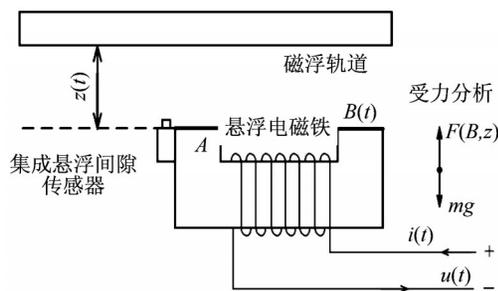


图3 单电磁铁控制系统

Fig. 3 Single electromagnet control system

极面积, mg 是车体重力。由于悬浮系统最重要的是“浮车”和“落车”过程,因此仅仅考虑竖直方向自由度。

基于电流控制的悬浮电磁力可以描述为

$$F = \frac{dW_m}{dz} = \frac{d}{dz} \int \omega_m dV = \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{2} \frac{\phi_r^2}{\mu_0 A} z \right) = \frac{1}{2} \frac{\phi_r^2}{\mu_0 A} \quad (1)$$

式中: ω_m 是磁场能量密度; W_m 是体积 V 的磁场能量; μ_0 是真空磁导率; ϕ_r 是主磁通; z 是悬浮间隙(未考虑时间变量)。

悬浮电磁铁的控制电压方程如下所示:

$$u(t) = Ri(t) + \frac{d\psi}{dt} \approx \frac{d(N\phi_r)}{dt} = Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2z(t)} \frac{di(t)}{dt} - \frac{\mu_0 N^2 A}{2(z(t))^2} \frac{dz(t)}{dt} \quad (2)$$

式中: ψ 是间隙磁链; R 是磁阻; N 是线圈数。

基于牛顿定律,单点悬浮系统的动力学方程可表示为

$$m\ddot{z}(t) = -F(t) + mg \quad (3)$$

式中: g 是重力加速度; m 是车体质量。

悬浮系统的非线性模型如下所示^[14]:

$$\begin{cases} mg = F(i_0, z_0) = \frac{\mu_0 AN^2}{4} \left(\frac{i_0}{z_0} \right)^2 \\ F(i, z) = \frac{\mu_0 AN^2}{4} \left(\frac{i(t)}{z(t)} \right)^2 \\ m\ddot{z} = -F(i, z) + mg \\ u(t) = Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2z(t)} \frac{di(t)}{dt} - \frac{\mu_0 N^2 A}{2(z(t))^2} \frac{dz(t)}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

式中: (i_0, z_0) 表示平衡点。

1.2 单侧悬浮架电磁铁线圈系统协同模型

为分析低速磁浮车辆控制器的协调作用,将两侧8个电磁铁线圈假设为2个完全相等的4个电磁铁线圈并分别协同,如图4所示。由于电磁铁线圈之间采用刚性连接,因此单侧电磁铁的连接结构可视为杆结构。单侧4个线圈采用2个控制回路进行连接,并且两头安装对应电磁铁,因此仅需要对2个回路的输出进行协同,机械结构如图5所示^[15-17]。

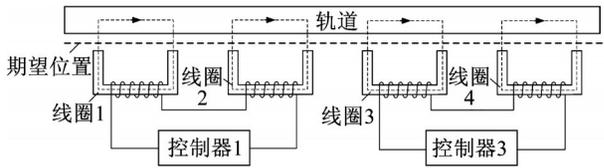


图4 电磁铁线圈作用下的悬浮系统结构(单侧)

Fig. 4 Structure of levitation system under the action of electromagnet coils (one side)

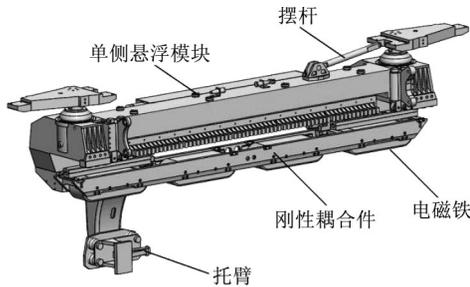


图5 单侧线圈耦合模型

Fig. 5 Coupling model of one-side coil

根据运行要求,在悬浮精度允许的范围内作如下假设:

(1)对于四线圈耦合件而言,轨道具有无穷大的刚度系数,因此只对四线圈耦合件相对于轨道的运动关系进行分析。

(2)假定漏磁通现象和磁场边缘效应不存在,并且忽略铁芯和轨道磁阻。

(3)4个线圈排列均匀,质量分布均匀。

设单侧悬浮架在竖直方向上的位移为 z_{cg} ,转动

时产生的线位移为 $z_{c\theta}$,期望间隙为 z_{tar} ,线圈之间距离为 $2l$,系统二系悬挂参数为 k_s, c_s ,悬浮模块(线圈组)相对于轨道的转角为 θ ,如图6所示。

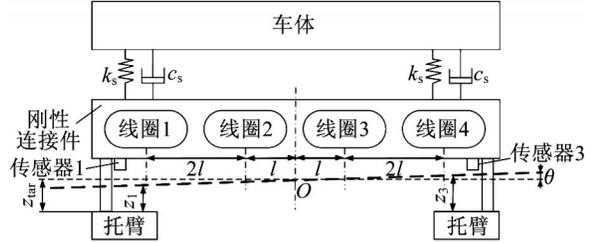


图6 单侧线圈作用下轨道变形和间隙变化示意图

Fig. 6 Schematic diagram of track deformation and air gap change under the action of one-side coil

假设 θ 很小时 z_{cg} 和 $z_{c\theta}$ 与单侧线圈输出间隙的关系为

$$z_{cg} = \frac{z_1 + z_3}{2}, z_{c\theta} = 3\theta l = \frac{z_1 - z_3}{2} \quad (5)$$

式中: z_1, z_3 分别为由传感器1和传感器3直接测得的间隙。 z_1, z_3 与单侧悬浮架运动坐标系中的位移 $z_{cg}, z_{c\theta}$ 存在如下变换关系:

$$\begin{bmatrix} z_{cg} \\ z_{c\theta} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_3 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} z_1 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{cg} \\ z_{c\theta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式(6)中常数矩阵定义为坐标系变换矩阵,如下所示:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_3 \end{bmatrix}, Q^{-1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

单侧电磁铁线圈电磁力的合力 F_L 为4个线圈提供电磁力的叠加,计算式如下所示:

$$F_L = F_1 + F_{1_{mid}} + F_{3_{mid}} + F_3 \quad (8)$$

式中: $F_1, F_{1_{mid}}, F_{3_{mid}}, F_3$ 分别为线圈1~4所提供的悬浮力。

质心平动的动力学方程可描述为

$$F_L - mg = -m\ddot{z}_{cg} \quad (9)$$

单侧悬浮架绕质心转动的相关动力学方程可描述为

$$T_\theta = I\ddot{\theta}, T_\theta = I \frac{\ddot{z}_{c\theta}}{3l} = (-3F_1 - F_{1_{mid}} + F_{3_{mid}} + 3F_3)l \quad (10)$$

式中: I 为转动惯量。定义转动等效质量 $m_\theta = I/(9l^2)$,可将式(10)进一步改写为

$$m_\theta \ddot{z}_{c\theta} = -\frac{1}{3} (3F_1 + F_{1_{mid}} - F_{3_{mid}} - 3F_3) \quad (11)$$

令转动动力 $F_\theta = -m_\theta \ddot{z}_{c\theta}$,垂向力 $F_g = -m\ddot{z}_{cg}$,则单侧悬浮架运动坐标系中的运动特性可描述为

$$\begin{bmatrix} F_g \\ F_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m & 0 \\ 0 & -m_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_{cg} \\ \ddot{z}_{c\theta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

悬浮力在单侧悬浮架运动坐标系与传感器坐标系下的变换关系为

$$\begin{bmatrix} F_g \\ F_\theta \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} 3F_1 + F_{1_mid} \\ F_{3_mid} + 3F_3 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 3F_1 + F_{1_mid} \\ F_{3_mid} + 3F_3 \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{-1} \begin{bmatrix} F_g \\ F_\theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

进而得到

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_3 \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} -\frac{1}{m} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{m_\theta} \end{bmatrix} \mathbf{Q} \begin{bmatrix} 3F_1 + F_{1_mid} \\ F_{3_mid} + 3F_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

传感器坐标系下单侧悬浮架动力学方程可以描述为

$$\begin{bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_3 \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} -\frac{1}{m} - \frac{1}{m_\theta} & -\frac{1}{m} + \frac{1}{m_\theta} \\ -\frac{1}{m} + \frac{1}{m_\theta} & -\frac{1}{m} - \frac{1}{m_\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3F_1 + F_{1_mid} \\ F_{3_mid} + 3F_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

根据以上分析可以看出,如果对单侧悬浮架进行整体分析,仅考虑2个控制回路悬浮间隙即可固定整体悬浮。由式(15)所示动力学方程的系数矩阵可以看出,系数矩阵为非对角阵,因此可以判断多点悬浮系统中不同输出之间存在耦合^[18]。

根据以往磁浮车辆单电磁铁悬浮系统的相关研究^[1-4],可以得到只考虑单电磁铁情况下的动力学描

$$\begin{cases} \Delta \ddot{z}_1 = \left(-\frac{k_c}{m} - \frac{k_c}{m_\theta}\right) \Delta i_1 + \left(\frac{k_z}{m} + \frac{k_z}{m_\theta}\right) \Delta z_1 + \left(-\frac{k_c}{m} + \frac{k_c}{m_\theta}\right) \Delta i_2 + \left(\frac{k_z}{m} - \frac{k_z}{m_\theta}\right) \Delta z_2 \\ \Delta \ddot{z}_3 = \left(-\frac{k_c}{m} + \frac{k_c}{m_\theta}\right) \Delta i_1 + \left(\frac{k_z}{m} - \frac{k_z}{m_\theta}\right) \Delta z_1 + \left(-\frac{k_c}{m} - \frac{k_c}{m_\theta}\right) \Delta i_2 + \left(\frac{k_z}{m} + \frac{k_z}{m_\theta}\right) \Delta z_2 \end{cases} \quad (19)$$

为简化方程书写,可以作如下假设:

$$\begin{aligned} a_{21} = a_{54} = \frac{k_z}{m} + \frac{k_z}{m_\theta}, a_{23} = a_{56} = -\frac{k_c}{m} - \frac{k_c}{m_\theta}, a_{24} = \\ a_{51} = \frac{k_z}{m} - \frac{k_z}{m_\theta}, a_{26} = a_{53} = -\frac{k_c}{m} + \frac{k_c}{m_\theta}, a_{32} = a_{65} = \\ \frac{2z_{tar} k_c}{\mu_0 N^2 A}, a_{33} = a_{66} = -\frac{2z_{tar} R}{\mu_0 N^2 A} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{z}_1 \\ \Delta \ddot{z}_1 \\ \Delta i_1 \\ \Delta \dot{z}_3 \\ \Delta \ddot{z}_3 \\ \Delta i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} & a_{24} & 0 & a_{26} \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ a_{51} & 0 & a_{53} & a_{54} & 0 & a_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta \dot{z}_1 \\ \Delta i_1 \\ \Delta z_3 \\ \Delta \dot{z}_3 \\ \Delta i_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ b_{31} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_3 \end{bmatrix}, \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta \dot{z}_1 \\ \Delta i_1 \\ \Delta z_3 \\ \Delta \dot{z}_3 \\ \Delta i_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中: b_{31} 、 b_{32} 分别为悬浮点1和悬浮点3所对应的控制增益; \mathbf{y} 为系统输出。

对单侧悬浮架悬浮系统输入输出以传递函数的形式进行描述,如下所示:

述与电磁特性描述。假设平衡点为 (i_0, z_0) ,在该点线性化可以得到

$$\Delta F_j = k_c \Delta i_j - k_z \Delta z_j, j=1, 1_mid, 3_mid, 3 \quad (16)$$

式中: k_c 为关于悬浮力变化量与悬浮电流变化量的变化系数; k_z 为关于悬浮力变化量与悬浮间隙变化量的变化系数; ΔF_j 为不同线圈产生的悬浮力变化量; Δi_j 、 Δz_j 为对应的电流变化量和间隙变化量。 k_c 和 k_z 可表示为

$$\begin{cases} k_c = \left. \frac{\partial F(i, z)}{\partial i} \right|_{(i_0, z_0)} = \frac{\mu_0 N^2 A}{2} \frac{i_0}{z_0^2} \\ k_z = \left. \frac{\partial F(i, z)}{\partial z} \right|_{(i_0, z_0)} = -\frac{\mu_0 N^2 A}{2} \frac{i_0^2}{z_0^3} \end{cases} \quad (17)$$

电磁铁线圈运动方程与控制电压特性方程可以由下式得到:

$$\begin{cases} m \Delta \ddot{z} = -k_c \Delta i + k_z \Delta z + f_d \\ \Delta u = R \Delta i + \frac{\mu_0 N^2 A}{2z_0^2} \Delta i - k_c \Delta \dot{z} \end{cases} \quad (18)$$

式中: Δu 为控制电压变化量; Δi 为稳定悬浮时电流变化量; Δz 为稳定悬浮时悬浮间隙变化量; f_d 为负载扰动力。

根据式(16)~(18)可以得到

悬浮间隙误差、悬浮间隙误差变化速率以及悬浮电流偏差可以采用向量形式表示,即 $[\Delta z_n \quad \Delta \dot{z}_n \quad \Delta i_n]^T, n=1, 3$ 。

结合式(20),采用一般空间状态方程对单侧悬浮架开环模型进行描述,如下所示:

$$\begin{bmatrix} \Delta z_1(s) \\ \Delta z_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1(s) \\ \Delta u_3(s) \end{bmatrix} \quad (22)$$

传递函数矩阵中的各个子传递函数如下所示:

$$G_{11}(s)=G_{22}(s)=\frac{-k_c(m+m_\theta)\left(s^3+\frac{2z_{tar}R}{\mu_0N^2A}s^2-\frac{8k_zz_{tar}R}{(m+m_\theta)\mu_0N^2A}\right)}{mm_\theta\frac{\mu_0N^2A}{2z_{tar}}\left(s^3+\frac{2z_{tar}R}{\mu_0N^2A}s^2-\frac{42k_zz_{tar}R}{m_\theta\mu_0N^2A}\right)\left(s^3+\frac{2z_{tar}R}{\mu_0N^2A}s^2-\frac{42k_zz_{tar}R}{m\mu_0N^2A}\right)} \quad (23)$$

$$G_{12}(s)=G_{21}(s)=\frac{-k_c(m-m_\theta)\left(s^3+\frac{2z_{tar}R}{\mu_0N^2A}s^2\right)}{mm_\theta\frac{\mu_0N^2A}{2z_{tar}}\left(s^3+\frac{2z_{tar}R}{\mu_0N^2A}s^2-\frac{42k_zz_{tar}R}{m_\theta\mu_0N^2A}\right)\left(s^3+\frac{2z_{tar}R}{\mu_0N^2A}s^2-\frac{42k_zz_{tar}R}{m\mu_0N^2A}\right)} \quad (24)$$

式(22)~(24)中: s 为对应特征值。根据对传递函数矩阵中各个子传递函数的相关描述,可以确定 $G_{12}(s)$ 、 $G_{21}(s)$ 为非零且有理,单侧悬浮架两端状态变量传递函数矩阵为非对角阵。由此可以确定,两端状态变量中不同输出之间存在耦合关系^[19-20]。

2 悬浮控制算法仿真平台设计

针对不同模型进行仿真分析(见图7),验证所设计控制算法在抑制动态扰动以及提升系统控制精度方面的有效性。

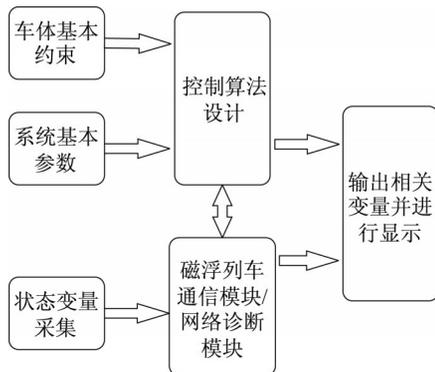


图7 悬浮系统算法仿真流程

Fig. 7 Simulation flow chart of the algorithm for levitation system

该仿真平台共由以下六部分组成:

- (1) 基于动力学方程对车体进行基本约束,定义时只考虑垂向位移以及多电磁铁间位移输出不同步的垂向摆动,不考虑横向位移。
- (2) 对如表1所示的系统物理参数进行定义。
- (3) 选取单点悬浮状态方程所需状态变量或者多点悬浮协同输出下状态变量用以构造模型。
- (4) 基于Simulink设计相关控制算法,并进行相关参数调试。
- (5) 采集相关变量进行网络通信,构成闭环控制回路,并接出相关信号线以便系统调试。
- (6) 保存仿真计算结果,对于不同控制算法进行

比较分析。

表1 多点悬浮系统物理参数

Tab.1 Physical parameters of multi-point levitation system

物理参数	参数值
悬浮块质量/kg	100
线圈匝数	700
目标间隙/m	0.008
电磁铁面积/m ²	0.024
真空磁导率/(H·m ⁻¹)	4π×10 ⁻⁷
线圈电阻/Ω	1.2
稳定电流/A	19.5
漏磁率	0

3 控制算法设计

3.1 PID控制算法

PID控制算法是最为经典且使用最为广泛的线性化控制方法,控制原理如图8所示^[21]。图8中, K_P 、 K_I 、 K_D 分别为比例控制增益、积分控制增益以及微分控制增益。

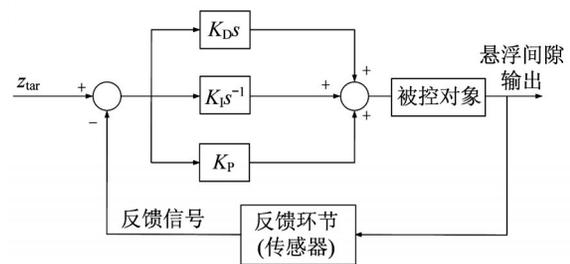


图8 PID控制原理框图

Fig. 8 Block diagram of PID control principle

采用PID控制时,如图3所示的控制表达式为

$$u(t)=K_P e(t)+K_I \int_0^t e(\tau) d\tau+K_D \frac{de(t)}{dt} = K_P \left(e(t)+\frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau+T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (25)$$

式中: $e(t)$ 为悬浮误差; T_I 为积分时间常数; T_D 为微分时间常数。令 $\tau=0.1$,可以得到 K_P 的变化情况及取值范围,得到的取值范围为(2 500,6 000)。

3.2 交叉耦合反馈控制算法

对悬浮架单侧线圈的协同控制可看作是两端线圈为基础的双轴系统,交叉耦合控制可以实现在受到非线性时变扰动时的同步协调控制。

设2个线圈的控制参数以及机械参数保持一致,定义 u_1 、 u_3 为悬浮点1和悬浮点3各自悬浮系统的控制输入,采用悬浮间隙反馈、悬浮间隙变化速率反馈两方面构成的双环反馈系统。定义 ε 为频域内悬浮间隙同步误差,可以采用下式进行描述:

$$\varepsilon = k\omega(\Delta z_1 - \Delta z_3) = k_s((\Delta z_1 - \Delta z_{tar}) - (\Delta z_3 - \Delta z_{tar})) = k_s(e_1 - e_3) \quad (26)$$

式中: k 为交叉耦合加权系数; ω 为耦合增益系数; e_1 、 e_3 分别为悬浮点1和悬浮点3反馈系统的悬浮间隙跟踪误差; k_s 为交叉耦合增益。

在对悬浮架单侧协同引入悬浮间隙交叉耦合之后,控制律 u_1 、 u_3 在频域范围内可以表示为

$$\begin{cases} u_1 = k_p(\Delta z_1(s) - \Delta z_{tar}(s)) + sk_v\Delta z_1(s) + \Delta f_1(s) + \varepsilon(s) \\ u_3 = k_p(\Delta z_3(s) - \Delta z_{tar}(s)) + sk_v\Delta z_3(s) + \Delta f_3(s) - \varepsilon(s) \end{cases} \quad (27)$$

式中: $\Delta f_1(s)$ 、 $\Delta f_3(s)$ 为单侧悬浮架两端各自对应的扰动量; k_p 为悬浮间隙反馈系数; k_v 为悬浮间隙变化速率反馈增益。

$$G_{11c}(s) = G_{22c}(s) = \frac{k_i W_A}{mm_\theta \frac{W_T}{4z_{tar}} s^3 + \frac{R}{2} W_T s^2 + \frac{(k_c k_v - k_i R) W_T}{m} s^3 + \frac{k_c k_v}{m_\theta} W_T s + \frac{k_f(k_p + 2k_s) - k_z R}{m_\theta z_{tar}}} \quad (30)$$

$$W_T = \frac{\mu_0 N^2 A}{z_{tar}}, W_A = (m + m_\theta) \frac{W_T}{2} s^3 + (m + m_\theta) R s^2 + 4k_c k_v s + 4k_f(k_p + k_s) - 4k_i R$$

$$G_{12c}(s) = G_{21c}(s) = \frac{-k_i W_D}{mm_\theta \frac{W_T}{4z_{tar}} s^3 + \frac{R}{2} W_T s^2 + \frac{k_c k_v W_T}{2m} + \frac{(k_c k_p - k_i R) W_T}{m} s^3 + \frac{R}{2} W_T s^2 + \frac{k_c k_v}{m_\theta} W_T s + \frac{k_f(k_p - 2k_s) - k_z R}{m_\theta z_{tar}}} \quad (31)$$

$$W_D = (m - m_\theta) \frac{W_T}{2} s^3 + (m - m_\theta) R s^2 + 4k_c k_s$$

式(30)和式(31)中: k_i 为扰动增益。可以看出,在扰动作用下,交叉耦合控制增益作用于系统输出的传递函数矩阵,但对全局悬浮间隙系统反馈不产生影响。

3.3 稳定性分析

根据悬浮间隙闭环输出可以得到,在对系统采取交叉耦合控制策略进行协同输出时,对应的特征方程为

根据式(27)与式(21),可以得到相关系统的闭环输出,如下所示:

$$\begin{bmatrix} \Delta z_1(s) \\ \Delta z_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G(s) & 0 \\ 0 & G(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z_{tar}(s) \\ \Delta z_{tar}(s) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_{11c}(s) & G_{12c}(s) \\ G_{21c}(s) & G_{22c}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1(s) \\ \Delta f_3(s) \end{bmatrix} \quad (28)$$

式中: $\begin{bmatrix} G(s) & 0 \\ 0 & G(s) \end{bmatrix}$ 是以悬浮间隙为输出变量的传递函数矩阵,其中 $G(s)$ 为2个线圈各自对应的传递函数。 $G(s)$ 的表达式如下所示:

$$G(s) = \frac{4\mu_0 AN^2 k_p k_v z_{tar}}{m\mu_0 AN^2} \frac{1}{s^3 + \frac{2z_{tar}R}{\mu_0 AN^2} s^2 + \frac{4k_p k_v z_{tar}}{m\mu_0 AN^2} s + \frac{4z_{tar}(k_p k_v - k_i R)}{m\mu_0 AN^2}} \quad (29)$$

式中: k_i 为电流误差反馈增益。

从式(29)可以看出,该式与传统单点悬浮系统传递函数高度一致。由此可以得到,在对系统引入交叉耦合控制算法后,并不影响以单线圈悬浮间隙为输出变量的传递函数。

$\begin{bmatrix} G_{11c}(s) & G_{12c}(s) \\ G_{21c}(s) & G_{22c}(s) \end{bmatrix}$ 为扰动作用于系统输出的传递函数矩阵,通过下式对各个子传递函数进行相关描述:

$$\begin{cases} s^3 + \frac{2z_{tar}R}{\mu_0 N^2 A} s^2 + \frac{2z_{tar}k_c k_v}{m\mu_0 N^2 A} s + \frac{4(k_c k_p - k_i R)z_{tar}}{m\mu_0 N^2 A} = 0 \\ s^3 + \frac{2z_{tar}R}{\mu_0 N^2 A} s^2 + \frac{2z_{tar}k_c k_v}{m_\theta \mu_0 N^2 A} s + \frac{4(k_i k_p + k_i k_s - k_z R)z_{tar}}{m_\theta \mu_0 N^2 A} = 0 \end{cases} \quad (32)$$

在进行单点悬浮控制时,同样可以根据悬浮间隙以及不同反馈控制参数列出特征方程组,因此在进行悬浮架单侧输出协同控制时得到的式(32)与单点悬浮控制得到的特征方程组具有高度相似性。根据式(32)以及特征根和系统稳定性的关系可以得到

$$k_p > \frac{k_i R}{k_c}, k_c > \frac{\mu_0 N^2 A (k_v k_p - k_i R)}{2k_i z_{tar}} \quad (33)$$

$$E(s) = \Delta z_1(s) - \Delta z_3(s) = \frac{4k_c z_{tar} (\Delta f_1(s) - \Delta f_3(s))}{m_0 \mu_0 N^2 A s^3 + \frac{2z_{tar} R}{\mu_0 N^2 A} s^2 + \frac{4k_c k_v z_{tar}}{m_0 \mu_0 N^2 A} s + \frac{4z_{tar} (k_i k_p + 2k_i k_s - 2k_z R)}{m_0 \mu_0 N^2 A}} \quad (35)$$

根据终值定理得到频域内稳定状态时的同步误差,如下所示:

$$E_s = e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \frac{\Delta f_1(s) - \Delta f_3(s)}{k_p + 2k_s - \frac{k_i R}{k_i}} \quad (36)$$

式中: E_s 表示频域内单侧悬浮架悬浮点1和悬浮点3之间的稳态同步协调误差。通过式(36)可以看出,耦合增益系数的变化可以对两线圈之间的悬浮间隙差异进行有效协同,即随着 k_s 的增大, E_s 逐渐减小。交叉耦合系数 k_s 取值不能过大,当取值过大时,可能会对系统整体稳定性造成影响。

4 数值仿真

4.1 PID控制算法仿真

在对磁浮列车悬浮系统进行PID算法仿真计算时,采用目前广泛使用的线性传递函数模型。控制参数取 $K_p=5\ 000$, $\tau=0.1$ 。负载扰动力如图9所示。分别对静浮状态以及可变负载状态下的悬浮间隙进行仿真,如图10和图11所示。

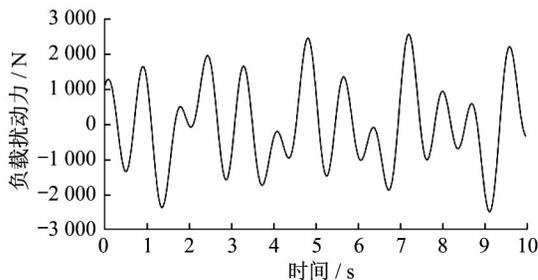


图9 负载扰动力

Fig. 9 Load disturbance force

从仿真结果可以看出,当磁浮列车处于静浮状态时,PID控制算法下的悬浮状态非常平稳,并且静态误差很小,大约为0.01 mm。然而,磁浮列车在运行过程中负载变化不可避免。可变负载状态下悬浮

在进行单点悬浮控制时,也可以根据悬浮间隙以及式(33),得到交叉耦合控制算法在单侧悬浮架协同控制时所需要满足的稳定性条件,如下所示:

$$0 < k_s < \frac{z_{tar} k_i R}{\mu_0 N^2 A} + \frac{k_z R}{2k_c} - \frac{k_p k_v}{2k_c} \quad (34)$$

系统静悬浮时,在系统参数摄动及外载扰动的作用下,频域内各个线圈之间的悬浮误差可以表示为

$$4k_c z_{tar} (\Delta f_1(s) - \Delta f_3(s))$$

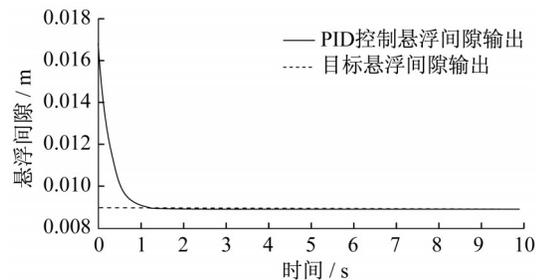


图10 静浮状态下悬浮间隙输出

Fig. 10 Output of air gap in static floating state

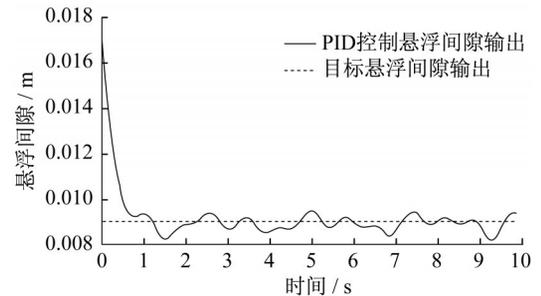


图11 可变负载状态下悬浮间隙输出

Fig. 11 Output of air gap under variable load conditions

间隙接近 ± 1 mm,这表明PID控制算法对干扰较为敏感,系统鲁棒性不强,在多点系统中难以保持悬浮间隙输出的一致性。

4.2 交叉耦合反馈控制算法仿真

为了对交叉耦合控制律在低速磁浮车辆多线圈协同输出中的效果进行验证,同样基于Matlab/Simulink平台搭建控制模型并进行数值仿真。为了与PID控制算法在负载变化激励影响下的控制性能进行对比,分别对悬浮点1施加不同干扰,并在交叉耦合增益 k_s 作用下描述4个电磁铁线圈的相互协同效果。

(1) $t=6$ s时在悬浮点1上施加等效扰动力为3

mm的阶跃扰动

从图12看出,交叉耦合协同作用下耦合增益 k_s 发挥着重要作用。当 $k_s=0$ 时,交叉耦合控制算法不起作用,线圈输出偏差很大。在等效扰动量为3 mm的阶跃扰动下,悬浮点1的输出悬浮间隙始终为11 mm,距离8 mm的期望悬浮间隙误差非常大,无

法实现稳定悬浮。然而,随着交叉耦合系数的增大,系统同步性增强,悬浮点间能够更好地协同。当 $k_s=200$ 时,系统同步性最强,不同悬浮点输出的悬浮间隙误差最小。虽然悬浮点1受到对应的阶跃扰动,但是由于交叉耦合作用,输出得到强制调整,系统恢复到稳定悬浮状态,整体误差不超过1.5 mm。

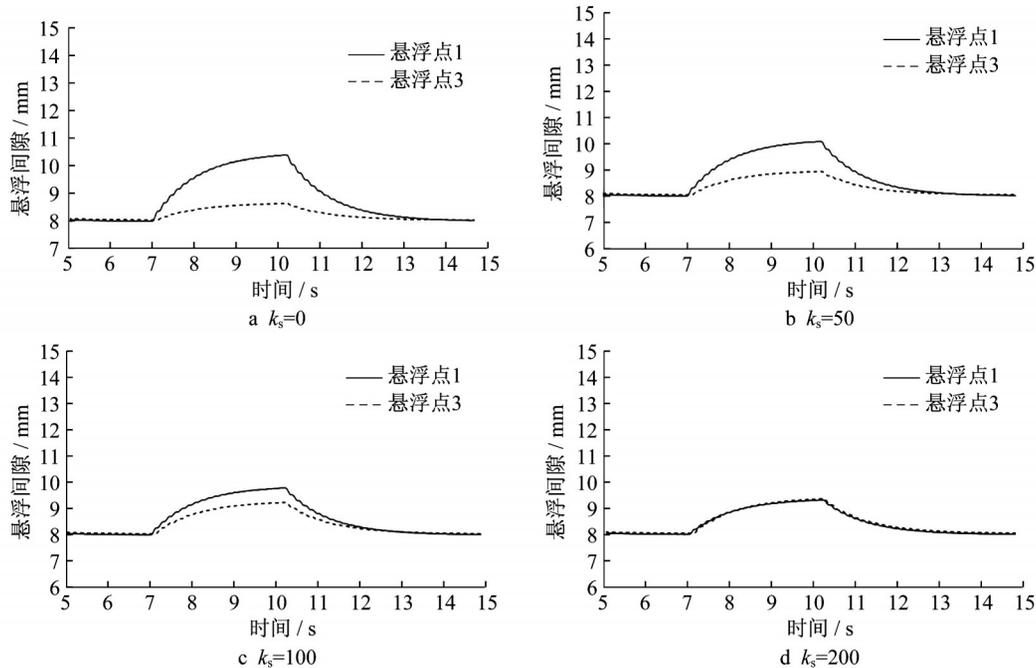


图12 阶跃扰动下不同交叉耦合增益的多线圈悬浮间隙响应

Fig. 12 Response of multi-coil air gap with different cross-coupling gains under step disturbance

(1) $t=7$ s时在悬浮点1上间隔4 s施加一次等效扰动量为 ± 2 mm的方波干扰(共4次)

从图13a可以看出,在交叉耦合协同作用下,耦合增益 k_s 发挥着十分重要的作用。 $t=7$ s时首次对悬浮点1施加方波时,出现2 mm悬浮间隙误差。与此同时,由于刚性耦合的作用,悬浮点3同样出现悬浮误差,大致为0.8 mm。在最后一次方波时,对悬浮点1造成的悬浮误差有轻微减轻,大致为1.8 mm,而悬浮点3出现的误差仅为0.2 mm。仿真结果表明,在方波扰动期间各个悬浮点输出悬浮间隙差异较大,各悬浮点间会产生较大耦合扰动,不利于悬浮稳定。如图13b所示, $k_s=50$ 时,悬浮点1首次遇到方波扰动的情况下,悬浮间隙误差相对于图13a有所减轻,而悬浮点3的误差相应放大,此时各个悬浮点有协同作用的迹象。如图13c~13d所示,进一步增大交叉耦合增益时,悬浮点1在方波扰动下的悬浮间隙误差有了明显降低,而悬浮点3的输出误差与悬浮点1有了明显的一致性。在图13d中,悬浮点1在受到方波扰动时误差仅为0.5 mm,悬浮点1

输出误差基本与悬浮点3保持一致。

5 试验验证

以同济大学磁浮交通工程技术研究中心低速磁浮试验车为例进行悬浮系统仿真,试验车的车轨耦合系统如图14所示。分析不同控制算法下试验车的悬浮情况。

通过冲击力干扰响应,比较多点悬浮系统交叉耦合控制算法的协同控制与独立控制的性能指标。试验分为两个步骤:第一步采用2个悬浮点独立控制而没有施加交叉耦合控制算法的悬浮控制策略,第二步采用加入交叉耦合控制算法的协同控制策略。试验结果如图15~18所示。

从图15~18可以看出,在加入交叉耦合控制算法的协同控制策略时,悬浮点1的间隙波动是未加交叉耦合控制策略时的40%,避免了因悬浮点1间隙的较大波动而发生该悬浮点滑撬触轨的可能,同时悬浮点3的间隙波动也有所减小。

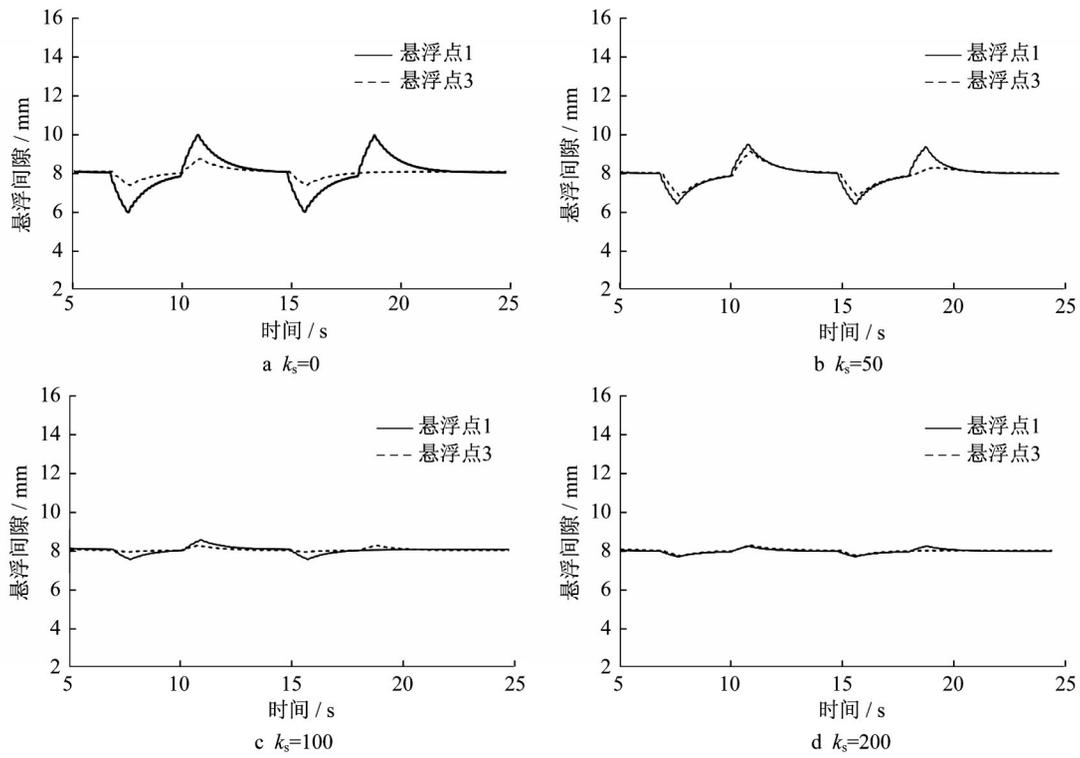


图13 方波扰动下不同交叉耦合增益的多线圈悬浮间隙响应

Fig. 13 Response of multi-coil air gap with different cross-coupling gains under square wave disturbance



图14 车轨耦合系统

Fig. 14 Vehicle-rail coupling system

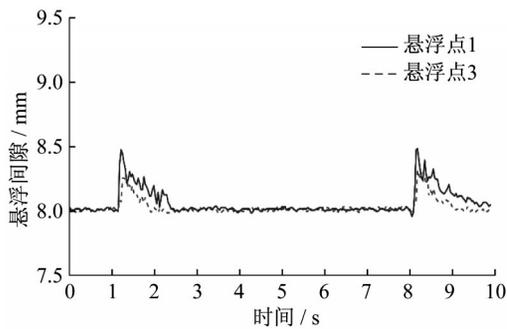


图15 悬浮间隙响应(未施加协同作用)

Fig. 15 Levitation air gap response (no synergistic effect)

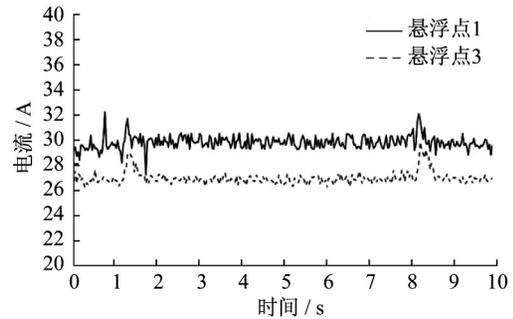


图16 电流响应(未施加协同作用)

Fig. 16 Current response (no synergistic effect)

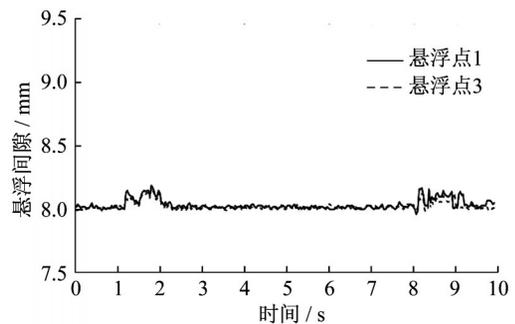


图17 悬浮间隙响应(协同作用)

Fig. 17 Levitation air gap response (synergistic effect)

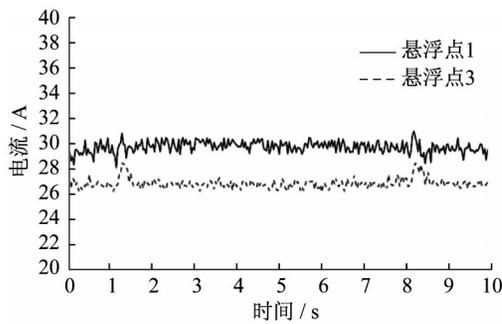


图18 电流响应(协同作用)

Fig. 18 Current response (synergistic effect)

6 结语

以单点悬浮模型为基础构造了多点悬浮模型,并且通过求解多点系统中子传递函数来确定多点悬浮系统不同输出之间存在耦合。引入交叉耦合控制算法,基于特征方程求解系统稳定所需要的控制参数,并且给出了频域内的同步误差。不断调节交叉耦合增益 k_s ,可以有效改善多点悬浮输出不一致的问题。交叉耦合增益使得悬浮点的输出强制同步,提高系统的鲁棒性,从而改善悬浮系统稳定性。

参考文献:

- [1] KIM H J, KIM C K, KWON S. Sliding mode control with disturbance estimator for maglev vehicle [C]//International Workshop and Conference on Photonics and Nanotechnology 2007. [S.l.]: International Society for Optics and Photonics, 2007: 1-6.
- [2] AL-MUTHAIRI N F, ZRIBI M. Sliding mode control of a magnetic levitation system [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2004, 2004(2): 93.
- [3] 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.
- [4] 陈琛, 徐俊起, 荣立军, 等. 轨道随机不平顺下磁浮车辆非线性动力学分析[J]. *交通运输工程学报*, 2019, 19(4): 115.
CHEN Chen, XU Junqi, RONG Lijun, *et al.* Nonlinear dynamics analysis of maglev under random track irregularity [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2019, 19(4): 115.
- [5] 封伟. 钢板磁悬浮系统控制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1998.
FENG Wei. Research on the control of magnetic levitation system of steel plate [M]. Hangzhou: Zhejiang University, 1998.
- [6] 李奇南. 钢板磁悬浮系统控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
LI Qinan. Steel plate maglev system control [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [7] 李奇南, 徐德鸿. 四电磁铁支撑钢板磁悬浮系统气隙交叉耦合控制[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(33): 129.
LI Qinan, XU Dehong. Gap cross-coupling control for 4-electromagnet supported steel plate magnetic suspension system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(33): 129.
- [8] 张敏, 马卫华, 李铁, 等. 线圈串接方式对悬浮控制性能的影响仿真[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(12): 149.
ZHANG Min, MA Weihua, LI Tie, *et al.* Simulation of the influence of coil connection mode on levitation control performance [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(12): 149.
- [9] 韩建达, 谈大龙, 蒋新松. 直接驱动机器人关节加速度反馈解耦控制[J]. *自动化学报*, 2000, 26(3): 289.
HAN Jianda, TAN Dalong, JIANG Xinsong. Joint acceleration feedback control for direct-drive robot decoupling [J]. *Journal of Automation*, 2000, 26(3): 289.
- [10] 赵希梅, 郭庆鼎. 数控机床多轴联动伺服电机的零相位自适应鲁棒交叉耦合控制[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(12): 129.
ZHAO Ximei, GUO Qingding. Zero phase adaptive robust cross coupling control for NC machine multiple linked servo motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(12): 129.
- [11] JAVAWANT B V, SINHA P K, WHEELER A R, *et al.* Development of 1-ton magnetically suspended vehicle using controlled d.c. electromagnets [J]. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1976, 23(9): 941.
- [12] TRUMPER L, OLSON M, SUBRAHMANYAN K. Linearizing control of magnetic suspension systems [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1997, 5(4): 427.
- [13] 屠旭永. 磁浮列车悬浮系统建模及悬浮控制策略的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
TU Xuyong. Modeling and control strategy of maglev suspension system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [14] 丁新平. 磁悬浮列车悬浮控制系统研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2004.
DING Xinping. Research on suspension control system of maglev train [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2004.
- [15] JALILI-KHARAAJOO M, TOUSI M M, BAGHERZADEH H, *et al.* Sliding mode control of voltage-controlled magnetic levitation systems [C]// IEEE Conference on Control Applications. [S.l.]: IEEE, 2003: 83-86.
- [16] 张鼎. 基于扩张状态观测器和非线性PID的数字式悬浮控制系统研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
ZHANG Ding. Research on digital suspension control system based on extended state observer and nonlinear PID [D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2005.
- [17] 陈慧星, 李云钢, 常文森. 电磁-永磁混合磁悬浮系统的悬浮刚度研究[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(27): 148.
CHEN Huixing, LI Yungang, CHANG Wensen. Research on

- levitation stiffness of hybrid suspension system [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 148.
- [18] 曹建荣, 虞烈, 谢友柏. 磁悬浮电动机的状态反馈线性化控制 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 22.
CAO Jianrong, YU Lie, XIE Youbai. Dynamic feedback linearization control for induced-type bearingless motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 22.
- [19] 张维煜, 朱詠秋, 鞠金涛, 等. 磁悬浮轴承研究现状及其发展 [J]. 轴承, 2016(12): 56.
ZHANG Weiyu, ZHU Huanqiu, JU Jintao, *et al.* Research status and development of magnetic bearings [J]. Bearing, 2016(12): 56.
- [20] 孙友刚, 李万莉, 林国斌, 等. 低速磁浮列车悬浮系统动力学建模及非线性控制 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2017, 45(5): 741.
SUN Yougang, LI Wanli, LIN Guobin, *et al.* Dynamic modeling and nonlinear control research on magnetic suspension systems of low-speed maglev train [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2017, 45(5): 741.
- [21] 刘恒坤, 郝阿明, 常文森. 磁浮列车搭接结构的非线性解耦控制 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26(8): 81.
LIU Hengkun, HAO Aming, CHANG Wensen. Nonlinear decoupling control of the joint-structure in a maglev train [J]. Control Theory and Applications, 2009, 26(8): 81.
-
- (上接第 1335 页)
- [4] 钱宏竞. 调度命令安全风险控制 [J]. 数字通信世界, 2017(10): 248.
QIAN Hongjing. Scheduling command security risk control [J]. Digital Communication World, 2017(10): 248.
- [5] 孙鹏举, 刘俊, 李博. 高速铁路列车调度员应急场景处置仿真系统设计研究 [J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(5): 77.
SUN Pengju, LIU Jun, LI Bo. Design and study of emergency scene disposal simulation system for high-speed railway train dispatchers [J]. Railway Transport and Economy, 2019, 41(5): 77.
- [6] 季丕祥. 提高铁路列车调度工作质量与应急处理能力的研究 [J]. 技术与市场, 2018, 25(9): 189.
JI Pixiang. Research on improving railway train dispatching work quality and emergency handling capability [J]. Technology & Market, 2018, 25(9): 189.
- [7] 李磊, 孟学雷, 韦强, 等. 基于案例推理的铁路行车事故应急决策方法研究 [J]. 铁道学报, 2014, 36(11): 1.
LI Lei, MENG Xuelei, WEI Qiang, *et al.* Research on emergency decision-making method of railway traffic accident based on case-based reasoning [J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(11): 1.
- [8] 马齐飞扬, 赵庶旭. 改进 TOPSIS 在铁路应急救援决策中的应用研究 [J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(1): 155.
MA Qifeiyang, ZHAO Shuxu. Research on application of improved TOPSIS in railway emergency rescue decision [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(1): 155.
- [9] 薛蕊, 马小宁, 李平, 等. 自然语言处理关键技术智能铁路中的应用研究 [J]. 铁路计算机应用, 2018, 27(10): 40.
XUE Rui, MA Xiaoning, LI Ping, *et al.* Nature language processing techniques and its applications in intelligent railway [J]. Railway Computer Application, 2018, 27(10): 40.
- [10] SHAH M, TU M, BERISHA V, *et al.* Articulation constrained learning with application to speech emotion recognition. [J]. EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing, 2019, 2019(1): 14.
- [11] ZUO Z, YU K, ZHOU Q, *et al.* Traffic signs detection based on faster R-CNN [C]//2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW). [S.l.]: IEEE Computer Society, 2017: 286-288.
- [12] SUTSKEVER I, VINYALS O, LE Q V. Sequence to sequence learning with neural networks [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2014, 4(27): 3104.
- [13] CHO K, VAN MERRIENBER B, GULCEHRE C, *et al.* Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation [J]. Computer Science, 2014, 6: 1078.
- [14] BAHDANAU D, CHO K, BENGIO Y. Neural machine translation by jointly learning to align and translate [C]// International Conference on Learning Representations. San Diego: [s.n.], 2015: 1-15.
- [15] 沙金. 精通正则表达式 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
SHA Jin. Mastering regular expressions [M]. Beijing: People Post Press, 2008.
- [16] LIN C Y, HOVY E. Automatic evaluation of summaries using N-gram co-occurrence statistics [C]//Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics on Human Language Technology. Tokyo: Association for Computational Linguistics, 2003: 71-78.