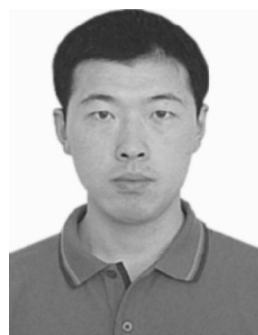


研
究
开
发基于 V 型轨道磁悬浮列车的
控制方法设计研究

弥 柱, 李云钢, 程 虎

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)



作者简介: 弥 柱 (1988-), 男, 硕士, 主要从事磁悬浮技术研究。

摘 要: 基于 V 型轨道的磁悬浮系统, 利用一套磁体可同时实现悬浮、导向及牵引功能, 其关键是控制算法的设计和调试。以一套基于 V 型轨道的磁悬浮试验装置作为实验平台, 根据其悬浮、导向和滚动 3 个自由度之间的关系, 合理选择控制量, 设计控制算法, 采用仿真和试验 2 种方法验证了控制算法的有效性。试验结果表明, 基于 V 型轨道的试验装置的悬浮、导向和滚动运动可以实现稳定悬浮。

关键词: V 型轨道; 磁悬浮列车; 悬浮导向; 控制方法**中图分类号:** U237; U292.91+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)05-0054-04Research on Design of Control Method for Maglev Vehicles
Based on V-shaped Guideway

MI ZHU, LI Yun-gang, CHENG Hu

(School of Electromechanic Engineering and Automation, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Controller design and debugging was the key for maglev system based on V-shaped guideway using a single set of magnets to simultaneously achieve suspension, guidance and propulsion. An experimental set with a tilt angle of 30° was proposed, and according to the relationship among suspension, guidance and roll motion, the reasonable control algorithm was chosen and designed. Simulation and experimental method were used to prove the effectiveness of the control algorithm. Experimental results showed that stability could be achieved for the suspension, guidance and roll motion of the experimental set.

Key words: V-shaped guideway; maglev train; suspension and guidance; control method

0 引言

磁悬浮列车是一种新型的轨道交通工具, 具有运行速度快、噪声小等特点^[1]。已投入商业运营的高速、低速磁悬浮列车各自存在优势及不足。高速磁悬浮列车用一套磁体实现悬浮和牵引, 用另一套实现导向, 结构复杂; 低速磁悬浮列车用一套磁体实现悬浮和导向, 采用短定子直线感应电机牵引, 牵引效率低^[2]。为了简化磁悬浮列车的结构, 提高牵引效率, 文献[3]提出了一种基于 V 型轨道的 EMS 磁悬浮列车方案, 用一套电磁铁实现悬浮、导向和牵引并对其悬浮导向控制技术进行了理论研究。分析表明其含悬浮、导向和滚动运动在内的开环系统是不稳定的, 但均能控。本文针对其悬浮控制问题设计悬浮、导向和滚动的控制算

法, 在仿真分析的基础上进行了试验研究, 实现了该 V 型磁悬浮装置的稳定悬浮。

1 数学模型的建立

本文重点研究基于 V 型轨道的磁悬浮列车的平面运动, 具体方案是将轨道与水平方向之间成一定的角度, 保证电磁铁产生的力在悬浮和导向方向上都有较大的分力, 平面示意图如图 1 所示。

文献[3]给出系统的线性化模型:

$$m \cdot \ddot{z} = K_{i0}(\Delta i_1 + \Delta i_2) + K_{\delta 0} z \quad (1)$$

$$m \cdot \ddot{y} = K_{i1}(\Delta i_1 - \Delta i_2) + K_{\delta 1} y + K_{\delta 2} \theta \quad (2)$$

$$J \cdot \ddot{\theta} = K_{i2}(\Delta i_1 - \Delta i_2) + K_{\delta 3} y + K_{\delta 4} \theta \quad (3)$$

$$\text{其中, } \Delta i_1 = i_1 - i_0, \Delta i_2 = i_2 - i_0, K_{i0} = \frac{2K_c i_0 \cos \alpha}{\delta_0^2},$$

收稿日期: 2011-12-24

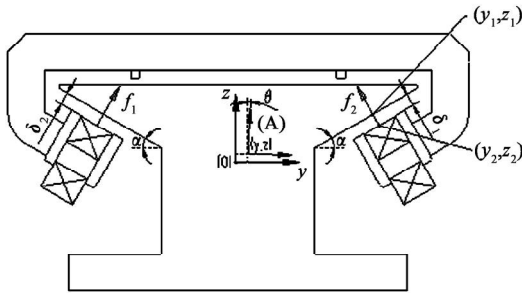


图1 试验装置平面运动的示意图

$$K_{i1} = \frac{2K_C i_0 \sin \alpha}{\delta_0^2}, K_{i2} = -\frac{2K_C C_2 i_0}{\delta_0^2},$$

$$K_{\delta 0} = \frac{4K_C i_0^2 \cos^2 \alpha}{\delta_0^3}, K_{\delta 1} = \frac{4K_C i_0^2 \sin^2 \alpha}{\delta_0^3},$$

$$K_{\delta 2} = K_{\delta 3} = -\frac{4K_C C_2 i_0^2 \sin \alpha}{\delta_0^3},$$

$$K_{\delta 4} = \frac{2K_C i_0^2 C_1}{\delta_0^2} + \frac{4K_C C_2^2 i_0^2}{\delta_0^3}.$$

在上述模型中： m 为转向架质量； J 为转向架绕质心的转动惯量； α 为轨道倾角； J 为转向架绕质心的转动惯量； C_1 和 C_2 为系统的固有参数，与系统的机械结构有关； K_C 由磁铁结构决定； i_1 和 i_2 分别是左侧和右侧电磁体的电流； r_1 和 r_2 分别为左侧和右侧磁体的吸力及其对质心的力臂； y 、 z 和 θ 分别为转向架在惯性坐标系中的侧向位移、垂向位移与滚动角； i_0 和 δ_0 分别表示平衡状态对应的电流与间隙。

文献[3]已经证明上述系统开环不稳定，但是系统能观可控。为了使得系统稳定，下一节将重点介绍控制算法的设计。

2 控制算法设计

为了使基于V型轨道磁悬浮列车实现稳定悬浮，本文采用状态反馈控制方法，需要考虑系统的状态量的选取^[4-5]。由基于V型轨道磁悬浮列车的线性化模型可知，为了保证列车在平面运动的状态唯一，就必须保证 y 、 z 、 θ 在零点达到稳定状态，控制器需要获得当前的状态变量 y 、 z 、 θ 及 $\dot{y}$ 、 $\dot{z}$ 、 $\dot{\theta}$ ，才能完成反馈控制。

2.1 状态变量的获取方法

直接测量状态变量 y 、 z 和 θ ，需要专门安装传感器支架和检测面，导致结构复杂。可以通过其他变量计算状态变量 y 、 z 和 θ ，本文利用间隙传感器检测间隙信号，然后通过一定的运算，来获取状态变量。

图2为传感器安装位置示意图，4个间隙传感器1、2、3、4分别安装在两侧磁铁和转向架顶部两侧。记传感器1、2测量得到的间隙为 δ_1 和 δ_2 ；传感器3、4测量得到的间隙为 δ_3 和 δ_4 。

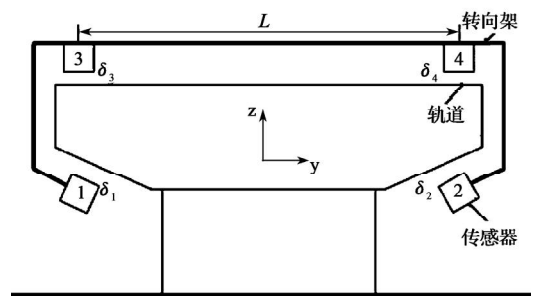


图2 传感器安装位置示意图

文献[3]中给出了 δ_0 、 δ_1 和 δ_2 与 y 、 z 和 θ 的关系：

$$\delta_1 = (-y - y_1) \sin \alpha - (z - z_1) \cos \alpha + C_1 \cos \theta + C_2 \sin \theta \quad (4)$$

$$\delta_2 = (y - y_1) \sin \alpha - (z - z_1) \cos \alpha + C_1 \cos \theta - C_2 \sin \theta \quad (5)$$

$$\delta_0 = -y_1 \sin \alpha + z_1 \cos \alpha + C_1 \quad (6)$$

将式(4)、式(5)和式(6)在平衡点附近线性化可得：

$$\begin{bmatrix} \delta_1 - \delta_0 \\ \delta_2 - \delta_0 \\ \theta \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} z \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \alpha & -\sin \alpha & C_2 \\ -\cos \alpha & \sin \alpha & -C_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于 α 不为零，则 T 可逆，说明状态变量 y 和 z 可由 δ_1 、 δ_2 和 θ 获得。

根据图2的几何关系，滚动角的计算公式为：

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\delta_4 - \delta_3}{L} \right) \quad (8)$$

根据式(7)和式(8)可知，由间隙 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 和 δ_4 便可获得状态 y 、 z 和 θ 。

$\dot{y}$ 、 $\dot{z}$ 、 $\dot{\theta}$ 可分别由 y 、 z 、 θ 经过微分后得到。针对目前悬浮间隙微分控制算法^[6]的现状，本文采取2个惯性环节相减的方法获取微分信号^[7]。微分算法的传递函数为：

$$G(s) = \frac{1}{T_2 - T_1} \left(\frac{1}{T_1 s + 1} - \frac{1}{T_2 s + 1} \right) - \frac{s}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1} \quad (9)$$

当频率较低时， $G(s) \approx s$ ，具有近似微分的效果；当频率较高时， $G(s) \approx 1/(T_1 T_2 s)$ ，能够抑制高频噪声放大。在实现微分的同时，还能够抑制噪声放大。

通过研究状态变量的获取方法可知，状态变量 y 、 z 和 θ ，可以通过测量间隙 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 和 δ_4 正确获取。本文选择 δ_1 、 δ_2 和 θ 作为状态反馈量。

2.2 控制方法

针对电磁铁的响应的特点，本文采用电流环^[8]的方法提高电流的响应速度。选取控制量为 $u = [\Delta i_1 \quad \Delta i_2]^T$ ，采用 δ_1 、 δ_2 和 θ 作为状态反馈量进行反馈控制，左右电磁铁的控制量 Δi_1 和 Δi_2 表达式如下：

$$\Delta i_1 = k_p (\delta_1 - \delta_0) + k_d \dot{\delta}_1 + k_{\theta} \theta + k_{\dot{\theta}} \dot{\theta} \quad (10)$$

$$\Delta \dot{i}_2 = k_p(\delta_2 - \delta_0) + k_d \dot{\delta}_2 - k_{p\theta} \theta - k_{d\theta} \dot{\theta} \quad (11)$$

选取状态变量为 $X = [z \ y \ \theta \ \dot{z} \ \dot{y} \ \dot{\theta}]^T$, 则控制量可以写成:

$$u = \begin{bmatrix} \Delta i_1 \\ \Delta i_2 \end{bmatrix} = KX = \begin{bmatrix} k_p & 0 & k_{p\theta} & k_d & 0 & k_{d\theta} \\ 0 & k_p & -k_{p\theta} & 0 & k_d & -k_{d\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} X \quad (12)$$

将 $u=KX$ 代入式 (1)、式 (2) 和式 (3), 可将系统的线性化模型等效为状态方程:

$$\dot{X} = (A+BK)X \quad (13)$$

由式 (13) 可知状态转移矩阵为六阶系统, 系统稳定的充要条件是 $(A+BK)$ 的特征根在左半平面^[9]。系统的特征方程为:

$$a_0 s^6 + a_1 s^5 + a_2 s^4 + a_3 s^3 + a_4 s^2 + a_5 s + a_6 = 0 \quad (14)$$

根据劳斯判据, 系统稳定的充要条件是劳斯表中的第一列各值为正^[10-11]。即满足关系式:

$$a_0 > 0, a_1 > 0, b_1 = \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1} > 0, c_1 = \frac{b_1 a_3 - a_1 b_2}{b_1} > 0, \\ d_1 = \frac{c_1 b_2 - b_1 c_2}{c_1} > 0, e_1 = \frac{d_1 c_2 - c_1 d_2}{d_1} > 0, f_1 = a_6 > 0。$$

其中 $b_2 = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{2a_1}$, $b_3 = a_6$, $c_2 = \frac{b_1 a_5 - a_1 b_3}{b_1}$, $d_2 = a_6$ 。本文

设计的控制算法的参数将遵循上述原则。下一节将结合试验装置的参数分析控制器参数, 并通过仿真和试验 2 种方法对控制算法进行了验证。

3 仿真和试验

3.1 模型参数

针对上述的分析结果, 根据基本参数计算出的悬浮、导向和滚动运动动力学模型的参数如表 1 所示。

表 1 基本参数取值

参数	值	参数	值
m	26 kg	J	1.36 kg·m ²
C_1	108 mm	C_2	159 mm
K_{i0}	27 N/A	K_{δ^1}	18 438 N/m
K_{i1}	15.6 N/A	K_{δ^2}	-12 907 N/m
K_{i2}	-11 N/A	K_{δ^3}	-12 907 N/m
K_{δ^0}	55 314 N/A	K_{δ^4}	9 067 N/m

3.2 仿真结果

在 Simulink 环境中建立模块的动力学模型, 按照 2.2 节的方法选取控制参数。仿真结果见图 3 及图 4。

0 时刻, 两边起浮, δ_1 和 δ_2 由 12.5 mm 减小到给定间隙 (8 mm), δ_3 和 δ_4 由 0 mm 逐渐增大到 2.8 mm, z 由 -5 mm 增加到 0 mm, y 和 θ 保持原来的状态不变, 起浮过程平稳。3.1 s 时, 系统受到干扰转矩的影响, 系统发生滚动和导向运动, y 增大, θ 减小, 之后逐渐趋于原来的稳定状态, δ_1 和 δ_4 减小, 之后快速恢复到原来的稳定

状态, δ_2 和 δ_3 增大, 然后快速恢复到稳定状态。

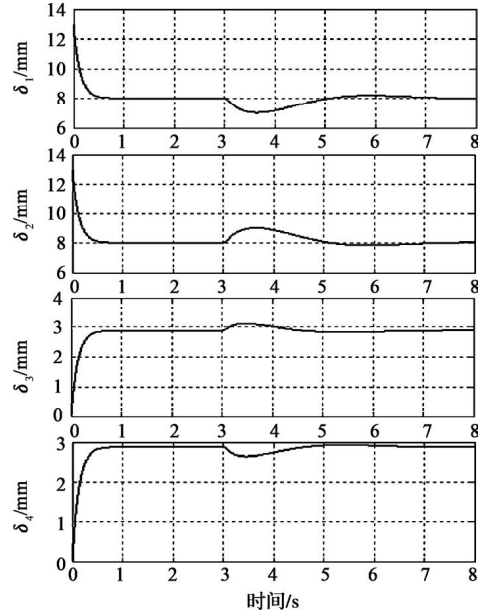


图 3 间隙变化曲线

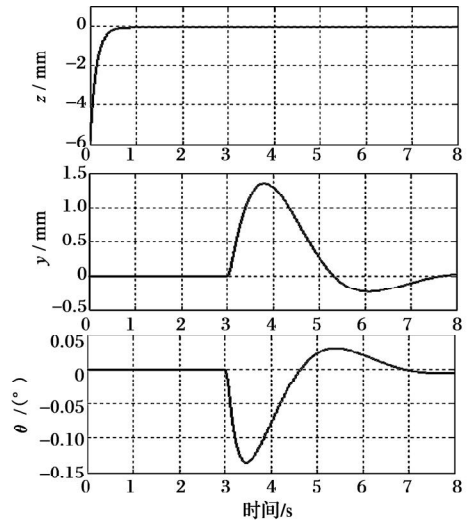


图 4 状态变化曲线

3.3 试验结果

针对试验装置, 参数如下。

$m=26$ kg, $J=1.36$ kg·m², $\alpha=30^\circ$, $C_1=108$ mm, $C_2=159$ mm, $K_c=1.06 \times 10^{-4}$ N·m²/A²。

将 2.2 设计的控制算法应用到图 5 的试验装置。

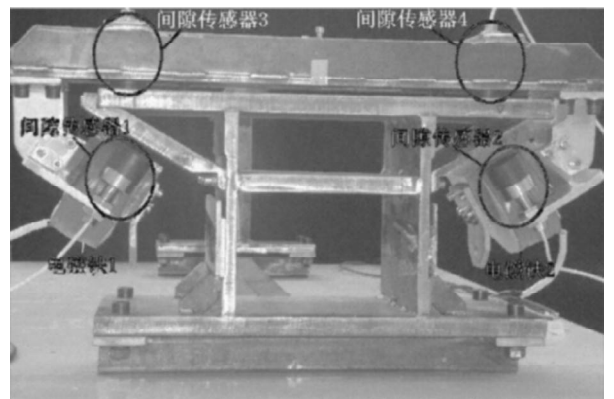


图 5 基于 V 型轨道试验装置

起浮过程中, 4个间隙传感器的试验结果如图6。

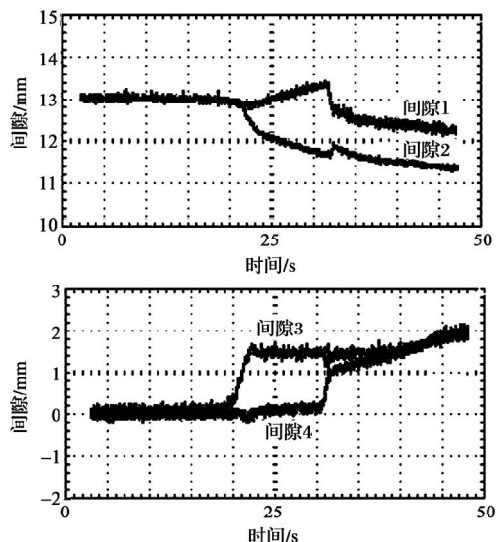


图6 起浮时4个间隙传感器波形

受到干扰时, 4个间隙传感器的间隙试验结果如图7。

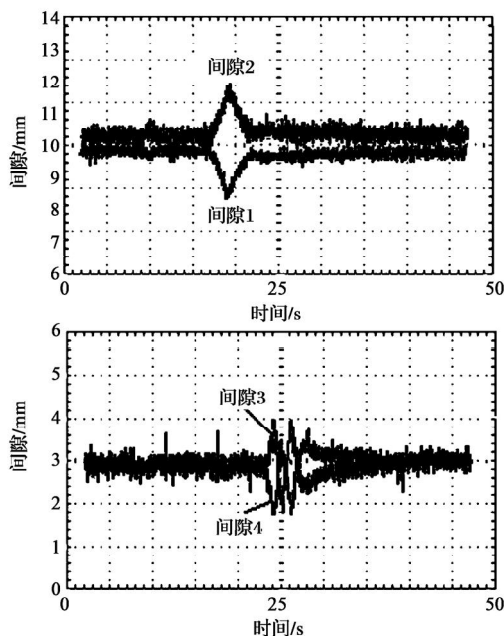


图7 施加干扰时4个间隙传感器波形

由试验结果可知, 起浮过程中, 间隙和角度同时由电磁铁控制, 间隙1先减小, 间隙2紧跟着发生变化, 由于2个电磁铁的水平方向上的力相反, 间隙1随之增大, 当间隙2减小到一定的值, 电磁铁1的力加强, 间隙1减小, 间隙2稍有增大, 最后在积分的作用下, 间隙1和间隙2会接近给定值, 最终达到稳定状态。间隙1为

10.2 mm, 间隙2为9.7 mm。当受到顺时针方向的干扰转矩时, 间隙1增大, 间隙2减小。在控制器的作用下, 间隙1和间隙2会恢复到原来的稳定状态。

起浮时, 间隙3先减小, 间隙4基本保持不变, 当间隙3减小到1.6 mm并保持一段时间, 之后间隙4减小, 间隙3与间隙4的值接近时, 二者在滚动角度积分的作用下, 同时增大, 最终稳定在3 mm, 二者值相等, 滚动角度为零。当受到顺时针干扰转矩时, 间隙3增大, 间隙4相应减少, 通过控制器的调节, 间隙3和间隙4会有一些波动, 最终恢复到原来的稳定状态。试验结果表明, 采用间隙和角度同时控制的方法, 增加角度控制能够保证列车无滚动, 可以使系统在平衡点实现稳定悬浮。

4 结语

本文建立了基于V型轨道磁悬浮系统的非线性和线性化模型, 该模型的开环响应是不稳定的, 但系统是可控能观的。针对线性化模型进行了仿真试验, 利用状态反馈的方法, 进行了仿真和试验研究。试验结果表明, 基于V型轨道磁悬浮系统在悬浮、导向和滚动方向上可以实现稳定悬浮。试验发现系统稳定后, 其滚动刚度比较小, 当受到干扰转矩时, 恢复的时间比较长, 有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 正田应介, 藤江恂治, 加藤纯郎. 磁气浮上铁道の技術 [M]. 日本: 日本オーム社, 1992.
- [2] 吴祥明. 磁悬浮列车 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.
- [3] 李云钢, 等. 一种采用V型轨道的磁悬浮列车用悬浮导向和牵引装置及其控制方法: 中国, 201110377719.3 [P]. 2012-01-17.
- [4] Hassan K Khalil. Nonlinear Systems [M]. Third Edition. London: Prentice Hall, 2002.
- [5] 刘德生. EMS型低速磁悬浮列车模块悬浮控制问题研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2006.
- [6] 刘恒坤, 郝阿明, 常文森. 悬浮间隙微分在磁悬浮列车系统中的应用 [J]. 控制工程, 2008, 15(1): 57-60.
- [7] 韩京清, 袁露林. 跟踪微分器的离散形式 [J]. 系统科学与数学, 1999, 19(3): 268-273.
- [8] 李云钢, 常文森. 磁悬浮列车悬浮系统的串级控制 [J]. 自动化学报, 1999, 25(2): 247-251.
- [9] Richard C Dorf, Robert H Bishop. 现代控制系统 [M]. 第八版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [10] M Gopal. Modern Control System Theory [M]. Second Edition. New York: Halsted Press, 1993.
- [11] 刘明俊, 于明祁, 杨泉林. 自动控制原理 [M]. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 2000.