

基于 V 型轨道的电磁悬浮列车的悬浮导向技术

李云钢,程 虎,张 晓,刘恒坤

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

摘要: 提出一种基于 V 型轨道的电磁悬浮(electro-magnetic suspension, EMS)型磁浮列车结构,该结构采用一套车载磁体及地面长定子线圈实现悬浮导向和牵引功能。首先,建立该结构列车平面运动的动力学模型,分析得出其含悬浮、导向和滚动运动在内的开环系统是不稳定的,但均可控。其次,根据其悬浮运动独立,而导向和滚动运动相互耦合的特性,提出独立设计悬浮控制器、导向和滚动控制器的控制策略。最后,针对某设计例构造反馈控制器。仿真结果表明,悬浮、导向及滚动运动都可实现稳定控制,同时验证了基于 V 型轨道由一套磁体同时实现悬浮导向和牵引的可行性。

关键词: V 型轨道; 电磁悬浮列车; 悬浮导向; 稳定性

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Research on Suspension and Guidance Technologies of EMS Maglev Trains Using V-shaped Guideway

LI Yungang, CHENG Hu, ZHANG Xiao, LIU Hengkun

(College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The structure of a kind of electro-magnetic suspension(EMS) maglev train based on v-shaped guideway is proposed, and this study focuses on its suspension and guidance technologies. In this structure, suspension, guidance and propulsion are realized by a single set of magnets on the vehicle and the long stator coils on the guideway, which promises the simplicity of structure when compared with existing maglev trains. Firstly, the dynamical model of the plane motion for the maglev train is established. By analysis, it is concluded that the open-loop system composed of suspension, guidance and roll motion is unstable but controllable. Secondly, the control strategy that suspension controller as well as guidance-rolling controller should be designed separately is designed, based on the conclusion that the suspension motion is independent, while the guidance and roll motion are coupled. Finally, a feedback controller is

designed according to the proposed control algorithm as an example. The simulation results indicate that suspension, guidance and roll motions can be effectively stabilized under the proposed controller, which validates the feasibility of realizing suspension, guidance and propulsion by a single set of magnets on the vehicle based on the v-shaped guideway.

Key words: V-shaped guideway; electro-magnetic suspension (EMS) maglev train; suspension and guidance; stability

纵向无接触悬浮、水平无接触导向及沿轨道方向的无接触牵引是磁浮列车的重要特征。悬浮力、导向力及牵引力的本质都是电磁力,由相应的磁体提供。如果这 3 套磁体各自独立,将导致磁浮列车的体积、重量庞大,结构复杂,造价高。实用系统通常要将它们进行一定的融合。比如,日本 High Speed Surface Transport(HSST)型磁浮列车的 U 型电磁铁是同时提供悬浮力和导向力的磁体^[1],而其牵引磁体是直线型异步感应电机;德国 Transrapid(TR)型磁浮列车的悬浮电磁铁是同时提供悬浮力和牵引力的磁体^[2],而其导向磁体是导向电磁铁。如果能够采用一套磁体同时提供悬浮力、导向力和牵引力,这对于提高磁浮列车的磁场利用率、减小磁浮列车的体积、重量,减小系统复杂度等具有重要意义。为此,本文提出了一种基于 V 型轨道和长定子同步直线电机牵引的电磁悬浮(EMS)型磁浮列车,该结构的牵引特性与 TR 型磁浮列车是类似的,本文重点讨论该结构的悬浮和导向特性。

1 基于一套磁体实现悬浮导向和牵引功能的基本结构

基于一套磁体实现悬浮导向和牵引功能的基本结构如图 1 所示。该结构由地面部分和车载部分组

成. 地面部分由支撑基础、轨道梁、左右两侧的长定子铁芯及线圈等组成. 左右两侧的长定子铁芯及线圈不是水平安装,而是与水平面交错成 α 角. 车载部分由转向架结构件、支撑块和左右两侧磁体等组成,简单起见,忽略转向架结构件及磁体的弹性,将它们看作是一个刚体. 转向架磁体也与水平面成 α 角安装,在平衡位置时,磁体表面与地面的长定子铁芯表面处于平行状态. 磁体是电磁铁或永磁电磁混合型磁铁,通过调节其励磁电流可以调节磁体和轨道之间的吸引力.

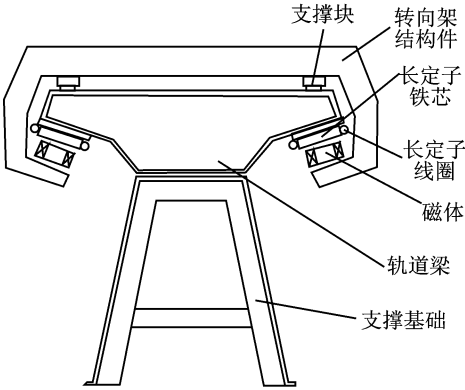


图 1 基于 V 型轨道磁浮列车的悬浮导向及牵引结构示意图

Fig. 1 Sketch of the suspension, guidance and propulsion structure for the Maglev vehicle using v-shaped guideway

为叙述方便,将图 1 中的轨道梁、长定子线圈及铁芯等统称为轨道,车载部分称为转向架. 由于长定子线圈及铁芯不是水平安装的,文中把这种轨道称为 V 型轨道. 转向架只是磁浮列车的下部结构,它与车厢通过二次系连接. 本文主要分析这种 V 型结构的悬浮导向基本原理,因此仅在图 1 所示的截面内分析问题,至于转向架的解耦功能及二次系的影响等,该结构与其他 EMS 型磁浮列车是类似的^[3-4].

2 悬浮导向及滚动运动的动力学模型

为了研究基于 V 型轨道的 EMS 型磁浮列车的悬浮导向原理,首先需要建立悬浮导向运动的动力学模型. 本文采用机理法建模. 首先建立轨道坐标系 $\{O\}$ 和转向架坐标系 $\{A\}$. 假设轨道静止,则轨道坐标系就是惯性坐标系. 惯性坐标系 $\{O\}$ 的原点取为车辆处于平衡时的质心位置,其 y 轴水平向右, z 轴竖直向上. 考虑到车厢及载重,车辆质心将如图 2 所示处于轨道上方. 转向架坐标系 $\{A\}$ 与转向架固连,其

原点取为车辆质心位置,其 y 轴和 z 轴的选取方法是,当转向架处于平衡位置时,坐标系 $\{A\}$ 与坐标系 $\{O\}$ 重合. 一般情况下,坐标系 $\{A\}$ 相对于坐标系 $\{O\}$ 有平动 (y,z) 和转动 θ ,称 z 方向的运动为悬浮运动, y 方向的运动为导向运动, θ 方向的转动为滚动运动.

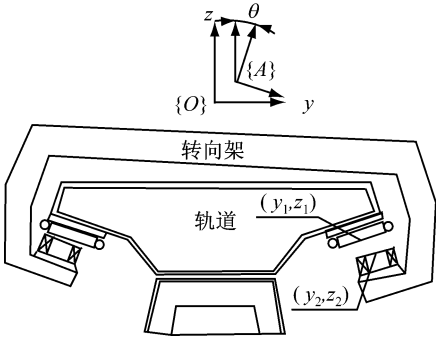


图 2 轨道坐标系与转向架坐标系的关系示意图

Fig.2 Sketch of the relationship between the guideway coordinate and the boggy coordinate

根据牛顿定律,转向架在惯性坐标系中的动力学模型为

$$m\ddot{z} = f_1 \cos \alpha + f_2 \cos \alpha - mg + f_z \tag{1}$$

$$m\ddot{y} = f_1 \sin \alpha - f_2 \sin \alpha + f_y \tag{2}$$

$$J\ddot{\theta} = r_2 f_2 - r_1 f_1 + M_\theta \tag{3}$$

式中: m 是车体质量; α 是轨道倾角; g 是重力加速度; f_1 和 r_1 分别是左侧磁体的吸力及其对质心的力臂; f_2 和 r_2 分别是右端磁体的吸力及其对质心的力臂; f_z 和 f_y 分别是悬浮方向和导向方向的外界干扰力; J 是车体相对其质心的转动惯量; M_θ 是滚动方向的干扰力矩.

方程(1)和(2)是车体质心平动运动的动力学方程,方程(3)是车体绕质心转动运动的动力学方程.

在动力学模型中, g 是常数, m , J 和 α 是设计参数,一旦设计完成,它们也是常数;左右两侧的力及力臂,是与转向架的运动状态及控制变量有关的变量,其关系为

$$f_1 = K_c \frac{i_1^2}{\delta_1^2} \tag{4}$$

$$f_2 = K_c \frac{i_2^2}{\delta_2^2} \tag{5}$$

$$r_1 = C_2 \cos \theta - C_1 \sin \theta \tag{6}$$

$$r_2 = C_2 \cos \theta + C_1 \sin \theta \tag{7}$$

式中: K_c 是与磁铁结构有关的常数; i_1 和 i_2 分别是左侧和右侧励磁体的电流,是控制变量,由控制器根

据传感器输入及一定的控制算法生成; δ_1 和 δ_2 分别表示左侧和右侧间隙; C_1 和 C_2 为常数.

$$\delta_1 = C_1 \cos \theta + C_2 \sin \theta - (y + y_1) \sin \alpha - (z - z_1) \cos \alpha \quad (8)$$

$$\delta_2 = C_1 \cos \theta - C_2 \sin \theta + (y - y_1) \sin \alpha - (z - z_1) \cos \alpha \quad (9)$$

$$C_1 = y_2 \sin \alpha - z_2 \cos \alpha \quad (10)$$

$$C_2 = y_2 \cos \alpha + z_2 \sin \alpha \quad (11)$$

式中: (y_1, z_1) 表示右侧轨道下表面中点在惯性坐标系 $\{O\}$ 中的坐标; (y_2, z_2) 表示右侧励磁体中点在转向架坐标系 $\{A\}$ 中的坐标, 它们都是常数.

方程(4), (5)是常用的电磁力表达式^[5], 力臂 r_1, r_2 及间隙 δ_1, δ_2 的表达式(6)~(9), 可基于图 3 中的几何关系求出.

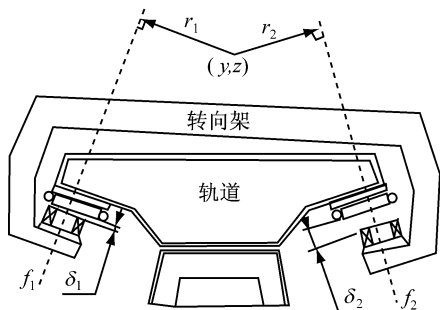


图 3 悬浮间隙及力臂与转向架运动状态的几何关系

Fig. 3 Geometrical relationship between the suspension gap, the arm of force and the movement of the boggy

3 稳定性及可控性分析

在动力学模型中, 电磁力与间隙及电流都不是线性关系, 因此不能直接应用线性系统理论来进行分析. 研究表明, 针对磁悬浮动力学模型中的非线性, 在平衡点附近线性化之后进行研究的方法是适用的^[6-7]. 因此本文基于线性化模型来分析.

3.1 悬浮运动分析

根据式(1), 并将式(4), (5), (8), (9)代入, 然后在平衡点线性化, 可求得悬浮运动的线性化方程为

$$m\ddot{z} = K_{i0}(\Delta i_1 + \Delta i_2) + 2K_{\delta 0} z \cos \alpha + f_z \quad (12)$$

式中: δ_0 和 i_0 分别是平衡状态对应的间隙与电流, 称为额定间隙和额定电流; 其他有关参数为

$$K_{i0} = K_i \cos \alpha; K_i = 2K_C i_0 / \delta_0^2; K_{\delta 0} = K_{\delta} \cos \alpha;$$

$$K_{\delta} = 2K_C i_0^2 / \delta_0^3; \Delta i_1 = i_1 - i_0; \Delta i_2 = i_2 - i_0.$$

选择状态向量 $\mathbf{x}_1 = [z \quad \dot{z}]^T$, 控制输入 $u_1 =$

$\Delta i_1 + \Delta i_2$, 则式(12)可写成以下标准形式:

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{B}_1 u_1 + f_z \quad (13)$$

式中:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2K_{\delta 0} \cos \alpha / m & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ K_{i0} / m \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据式(14), \mathbf{A}_1 的特征值为 $\pm \sqrt{2 \cos \alpha K_{\delta 0} / m}$, 根据控制理论^[8], 由于 \mathbf{A}_1 有右半平面的特征值, 因此悬浮开环运动是不稳定的.

根据式(14), 悬浮运动的能控性矩阵为

$$\mathbf{P}_{c1} = [\mathbf{B}_1 \quad \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_1] = \begin{bmatrix} 0 & K_{i0} / m \\ K_{i0} / m & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

由于 $K_{i0} > 0$, 所以该能控阵是满秩的. 根据控制理论^[9], 由于能控阵是满秩的, 因此该系统是能控的, 于是可利用状态变量构造控制变量 u_1 , 使得悬浮闭环运动稳定.

3.2 导向运动及滚动运动分析

根据式(2), 并将式(4), (5), (8), (9)代入, 然后在平衡点线性化, 可求得导向运动的线性化方程为

$$m\ddot{y} = K_{i1}(\Delta i_1 - \Delta i_2) - K_{\delta 1}(2C_2 \theta - 2y \sin \alpha) + f_y \quad (16)$$

式中: $K_{i1} = K_i \sin \alpha$; $K_{\delta 1} = K_{\delta} \sin \alpha$.

类似地, 根据式(3), 并将式(4)~(9)代入, 然后在平衡点线性化, 可求得滚动运动的线性化方程为

$$J\ddot{\theta} = (K_{cm} + K_{\theta})\theta - 2K_{\delta 1} C_2 y - K_i C_2(\Delta i_1 - \Delta i_2) + M_{\theta} \quad (17)$$

式中: $K_{cm} = 2K_C C_1 i_0 / \delta_0$; $K_{\theta} = 2K_{\delta} C_2$.

由于导向运动方程中含有滚动的角度状态 θ , 滚动运动方程中又含有导向运动的状态 y , 因此, 应将这两个方程统一起来考虑. 选取状态变量、控制变量和干扰量分别为

$$\mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}; u_2 = \Delta i_1 - \Delta i_2; \mathbf{f}_d = \begin{bmatrix} 0 \\ f_y / m \\ 0 \\ M_{\theta} / J \end{bmatrix}$$

那么得到导向及滚动运动的状态方程为

$$\dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{B}_2 u_2 + \mathbf{f}_d \quad (18)$$

式中:

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{2K_{\delta 1} \sin \alpha}{m} & 0 & -\frac{2K_{\delta 1} C_2}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{2K_{\delta 1} C_2}{J} & 0 & \frac{K_{cm} + K_{\theta}}{J} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_2=\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{i1}}{m} \\ 0 \\ -\frac{K_iC_2}{J} \end{bmatrix} \tag{19}$$

根据式(19),可求得开环系统的特征方程为

$$s^4-\left(\frac{2K_{\delta1}\sin\alpha}{m}+\frac{K_{cm}+K_{\theta}}{J}\right)s^2+\frac{2K_{cm}K_{\delta1}\sin\alpha}{mJ}=0 \tag{20}$$

令 $q=s^2$,式(20)可重写为

$$q^2-\left(\frac{2K_{\delta1}\sin\alpha}{m}+\frac{K_{cm}+K_{\theta}}{J}\right)q+\frac{2K_{cm}K_{\delta1}\sin\alpha}{mJ}=0 \tag{21}$$

这是一个关于 q 的二次方程,其判别式 $\Delta>0$,结合各项系数可知,它的两个根均为正实数,进而可得到方程(20)有 4 个实数根,左半面和右半面各有 2 个,可见,导向及滚动方向的开环运动是不稳定的。

根据式(19),可求得导向及滚动运动的能控性矩阵为

$$\mathbf{P}_{c2}=\begin{bmatrix} 0 & K_{i1}/m & 0 & C_3 \\ K_{i1}/m & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & -K_iC_2/J & 0 & C_4 \\ -K_iC_2/J & 0 & C_4 & 0 \end{bmatrix} \tag{22}$$

式中: $C_3=2K_{\delta1}K_{i1}\sin\alpha/m^2+2K_{\delta1}K_iC_2^2/mJ$, $C_4=-2K_{\delta1}K_{i1}C_2/mJ-K_iC_2(K_{cm}+K_{\theta})/J^2$ 。

由于 $C_4K_{i1}J+C_3C_2K_{im}\neq0$,能控性矩阵(22)是满秩的。可见,导向及滚动运动也是能控的,可以利用状态变量构造控制变量 u_2 ,使得闭环运动稳定。

此外,由于 $u_1=\Delta i_1+\Delta i_2$, $u_2=\Delta i_1-\Delta i_2$,因此 u_1 和 u_2 的选取是独立的,即上述的两个控制器(悬浮控制器、导向及滚动控制器)可以独立设计。

4 设计例及仿真

4.1 模型参数及控制器设计

在某设计例中,选取基本参数如表 1 所示。

表 1 某设计例的基本参数

Tab.1 The values of basic parameters in design example

参数	取值	参数	取值
m	5 000 kg	α	15°
i_0	25 A	δ_0	8 mm
y_2	1.1 m	z_2	-0.7 m
J	5 000 kg·m ²		

结合式(13)和式(16),可得悬浮运动及导向和滚动运动的动力学模型的参数为

$$\mathbf{A}_1=\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2\,366.5 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_1=\begin{bmatrix} 0 \\ 0.392 \end{bmatrix} \tag{23}$$

$$\mathbf{A}_2=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 169.9 & 0 & -578.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -578.6 & 0 & 1\,980 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_2=\begin{bmatrix} 0 \\ 0.105\,0 \\ 0 \\ -0.357\,7 \end{bmatrix} \tag{24}$$

针对悬浮运动,根据控制理论,可设计出一个稳定的控制器为

$$u_1=\Delta i_1+\Delta i_2=[-14\,603\quad-204]x_1 \tag{25}$$

针对导向运动及滚动运动,可设计出一个稳定的控制器为

$$u_2=\Delta i_1-\Delta i_2=[9\,000\quad3\,900\quad12\,477\quad1\,367]x_2 \tag{26}$$

根据式(25)和式(26),进行线性变换,可得左侧及右侧励磁体的控制电流方程为

$$\begin{cases} \Delta i_1=[-3\,025.4\quad-41]x_1+ \\ [4\,500\quad1\,950\quad6\,238.5\quad683.5]x_2 \\ \Delta i_2=[-3\,025.4\quad-41]x_1- \\ [4\,500\quad1\,950\quad6\,238.5\quad683.5]x_2 \end{cases} \tag{27}$$

初步分析时,可假设用于反馈的状态变量是直接得到的。实际应用时,通常是采用一些传感器,并结合一些观测器的算法^[10-11]来获取状态变量。根据控制器和观测器的分离原理,观测器的模态不会影响控制器的模态,因此对控制器进行独立分析是合适的。

4.2 仿真结果

所述结构的闭环系统由非线性模型表达式(1)~(11)和控制器方程(27)组成。代入表 1 所示的参数,可计算得到系统在平衡点 $\{y=0\text{ mm}, z=0\text{ mm}, \theta=0^\circ\}$ 处,左右两侧的间隙相等,均为 8.0 mm。

假设初始时刻转向架落在轨道上,两侧的悬浮间隙不等,分别为 15.0 mm 和 16.5 mm,根据公式(8)和(9),可得此时的系统状态偏离平衡点为: $\{y=3.0\text{ mm}, z=-8.0\text{ mm}, \theta=0^\circ\}$ 。将该初始状态代入系统闭环模型进行仿真,并在第 5 s 时,给悬浮、导向和滚动运动同时施加干扰。仿真结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,该过程中系统的运动可分为 4 个阶段。第 0~2 s,系统在控制器作用下,由初始的

非平衡态逐渐调节到平衡点,因导向和滚动运动相互耦合,滚动角即使在初始状态为零,在该过程中仍随导向运动的调整而变化;第 2~5 s,系统不受外部干扰,在控制器作用下维持在平衡状态;第 5~8 s,系统受到外部干扰偏离平衡点,在控制器作用下经 3 s 时间逐渐调整回到平衡点;第 8~10 s,系统在控制器作用下维持在平衡态.上述仿真结果表明,基于 V 型轨道的磁浮系统,在式(27)提出的控制策略下,能够实现稳定控制,其调节时间约为 1.5 s;所提出的控制方法在外界干扰作用下,能够维持系统稳定.

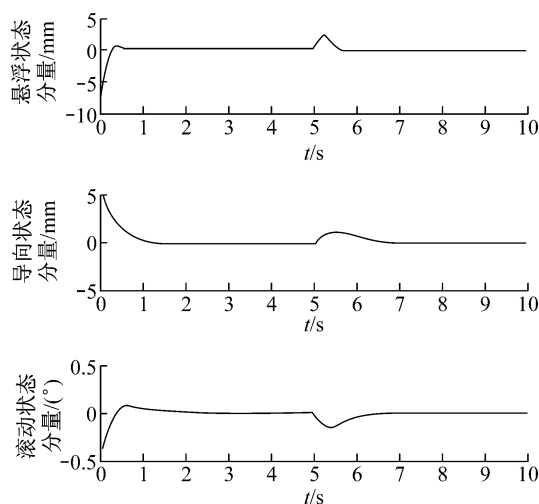


图 4 设计例的悬浮导向及滚动运动的仿真曲线

Fig. 4 Simulation curves of the suspension, guidance and rolling movement for the design example

5 结论

本文提出一种基于 V 型轨道的磁浮列车结构,其车载磁体只有一套,配合轨道长定子线圈,共同实现对车辆的悬浮、导向和牵引.文中针对所提出的列车结构,分析了磁力、力臂等与转向架状态之间的对应关系,推导出悬浮导向及滚动运动的动力学模型.分析表明,开环系统是不稳定的,但通过构造状态反馈控制器即可实现闭环系统的稳定控制.进一步研究发现,系统的悬浮运动独立,而导向与滚动运动相互耦合,从而提出分别基于悬浮运动方程和导向滚动运动方程,独立设计控制器的方法.最后,结合某设计例设计其反馈控制器,仿真结果表明,系统的悬浮、导向及滚动运动可实现稳定控制,在外部扰动下,系统也能够回复到平衡位置.

本文提出的基于 V 型轨道的磁浮列车结构采用

直线同步牵引方式,具有牵引效率高、运行速度快的优点,此外,该结构不需额外的导向磁铁和导向控制系统,结构简化,是一种极具发展潜力的磁浮列车结构.文中建立了该结构平面运动的动力学模型,并提出了一种状态反馈控制策略,验证了采用该结构由一套磁体同时实现悬浮、导向和牵引的可行性.

参考文献:

- [1] Yoshihide Yasuda, Masaaki Fujino, Masao Tanaka, et al. The first HSST maglev commercial train in Japan[C]// Maglev '2004 Proceedings, Shanghai:[s. n.],2004: 76-85.
- [2] 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 Scientific and Technical Press, 2003.
- [3] 赵春发. 磁悬浮车辆系统动力学研究[D]. 成都: 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 2002.
ZHAO Chunfa. Maglev vehicles system dynamics [D]. Chengdu: Graduate Schol of Southwest Jiaotong University, 2002.
- [4] 赵志苏. 摆式悬架高速磁悬浮列车转向特性研究[J]. 机车电传动, 2009(1):43.
ZHAO Zhisu. Researches on turning characteristic of tilting suspension high-speed maglev trains [J]. Electric Drive for Locomotives, 2009, (1): 43.
- [5] 李云钢, 常文森. 磁浮列车悬浮系统的串级控制[J]. 自动化学报, 1999, 25(2):247.
LI Yungang, CHANG Wensen. Cascade control of an EMS maglev vehicle's levitation control system[J]. Acta Automatica Sinica, 1999, 25(2): 247.
- [6] Hassan K Khalil. Nonlinear systems [M]. 3rd ed. [S. l.]: Prentice Hall Press, 2002.
- [7] 刘德生. EMS 型低速磁浮列车模块悬浮控制问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2006.
LIU Desheng. Research on the module suspension control problem of the EMS low-speed maglev [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2006.
- [8] Gopal M. Modern control system theory[M]. 2nd ed. [S. l.]: Wiley, 1993.
- [9] Richard C Dorf, Robert H Bishop. 现代控制系统[M]. 8 版. 谢红卫, 邹逢兴, 张明, 等译. 北京: 高等教育出版社, 2003.
Richard C Dorf, Robert H Bishop. Morden control systems [M]. 8th ed. Translated by XIE Hongwei, ZOU Fengxing, ZHANG Ming, et al. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [10] Kim Youn Hyun, Kin Kwang Min, Lee Ju. Zero power control with load observer in controlled-PM levitation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(4): 2851.
- [11] 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.
HAN Jingqing, YUAN Lulin. The discrete form of the tracking differentiator [J]. The Systems Science and Mathematical Science, 1999, 19(3): 268.