

模块结构 EMS 型磁浮列车的导向控制研究*

李云钢 常文森

(国防科技大学自动控制系 长沙 410073)

摘要 本文研究了模块结构 EMS 型磁浮列车中的一对相互错开的电磁铁的导向模型,采用衰减记忆算法实施导向控制,通过仿真比较了主动控制系统与自稳定系统的导向效果,讨论了导向控制对纵向悬浮的影响。

关键词 磁浮列车, 导向, 控制, 仿真

分类号 TP271

Guidance Control Research of Module Structure EMS Maglev Vehicle

Li Yungang Chang Wensen

(Department of Automatic Control, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract This paper deals with the guidance model of a pair of electromagnets displaced by each other in side direction of module structure EMS maglev vehicle, realizes guidance control using forgetting factor, and compares the guidance results of active control system and self-stable system by simulation. The influence of guide control on suspension of the vehicle is discussed.

Key words maglev vehicle, guide, control, simulation.

早期的 EMS 型磁浮列车采用的是“刚度自由度”的控制概念,主要有德国的 TR01、TR02、TR04 以及日本的 HSST-01、HSST-02 等车型^[1]。70 年代中期,德国建立了磁轮的控制概念^[2],日本建立了模块的概念^[3]。

磁浮列车在铅垂方向是靠电磁铁产生的电磁力来平衡重力以及各种干扰力,实现悬浮的。为了使悬浮车体能沿轨道平稳地行驶,对其侧向摆动,必须加以约束。采用磁轮结构的磁浮列车另外安置了导向电磁铁,而模块有一定的自定心作用,结构上相对比较简单。我们研制的磁浮转向架就采用了模块结构,在悬浮方向通过设计鲁棒控制器,可实现

* 1996 年 9 月 14 日收稿

空载 3.5t, 满载 6.5t 的有效悬浮, 测试表明, 其空载侧向力可达 750kg, 依靠结构上的阻尼, 基本上可以保证侧向的稳定性^[4]。

为了进一步提高导向能力, 本文从基本电磁力公式出发, 建立了模块中一对相互错开的电磁铁(简称双铁)的导向模型, 进行了主动控制器的设计。由于磁转向架从结构上保证了各个运动自由度的解耦, 双铁的导向效果就代表了磁浮列车的导向效果。仿真表明, 主动控制可以增加侧向阻尼, 减小侧向摆动, 还可以提供较大的侧向力, 从而可以承受较大的侧向风力以及在弯道运行时提供一定的向心力。

1 模块结构与双铁导向模型

在模块中, 我们按图 1 的方式来固定电磁铁和安放传感器。电磁铁 1、2 和间隙传感器 S_1 、纵向加速度传感器 a_1 以及侧向加速度表 z_1 组成一套独立的控制系统。电磁铁 3、4 和间隙传感器 S_2 、纵向加速度传感器 a_2 以及侧向加速度表 z_2 组成另一套独立的控制系统。

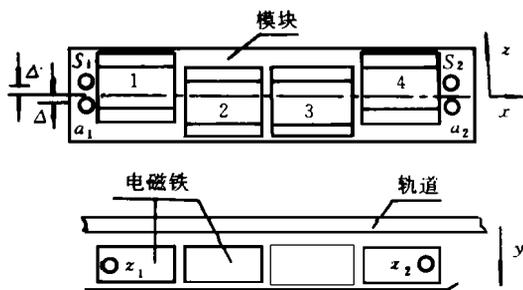


图 1 模块中电磁铁和传感器的安装

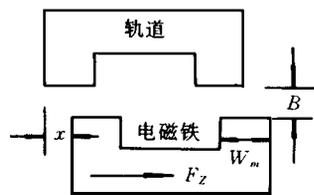


图 2 电磁铁的导向力

考虑图 2 所示的 U 形电磁铁和倒 U 形轨道, 假设它们都采用无限大磁导率的非饱和磁性材料, 由电磁场理论以及保角变换, 可以得到其导向力为^[5]:

$$F_z = - \frac{\mu_0 N^2 A I^2}{4 \delta^2} \frac{\delta}{\pi W_m} \tan^{-1} \left[\frac{x}{\delta} \right] \quad (1)$$

其中: μ_0 —空气中的磁导率, π —圆周率, A —有效磁极面积, W_m —电磁铁以及轨道的极宽, N —线圈匝数, I —线圈电流, δ —电磁铁和轨道之间的间隙, x —电磁铁和轨道错开的距离, F_z —侧向电磁力。

对于图 1 所示的电磁铁对 1、2, 本身相对轨道中心线的位移分别为 Δ 和 $-\Delta$, 当模块相对轨道的侧移为 z 时, 电磁铁 1、2 产生的侧向力以及合力分别为:

$$F_1 = - \frac{\mu_0 N^2 A I_1^2}{4 \delta^2} \frac{\delta}{\pi W_m} \tan^{-1} \left[\frac{z + \Delta}{\delta} \right] \quad (2)$$

$$F_2 = - \frac{\mu_0 N^2 A I_2^2}{4 \delta^2} \frac{\delta}{\pi W_m} \tan^{-1} \left[\frac{z - \Delta}{\delta} \right] \quad (3)$$

$$F = F_1 + F_2 \quad (4)$$

根据牛顿第二定律, 并考虑侧向干扰力 F_δ , 双铁侧向运动方程为:

$$mz = F + F_\delta \quad (5)$$

为了保持纵向悬浮的额定间隙,两电磁铁的电流之和基本不变;设 R_1 为电磁铁的等效电阻,侧向控制方案为

$$\Delta u = R_1 \Delta I \quad (6)$$

$$I_1 = I_0 + \Delta I \quad (7)$$

$$I_2 = I_0 - \Delta I \quad (8)$$

方程(2)~(8)就是双铁导向控制的基本非线性模型。

2 控制器设计

将双铁的非线性导向模型在平衡点 $I_1 = I_0, I_2 = I_0, \delta = \delta_0, z = 0$ 附近小范围线性化,可得到线性化模型为:

$$F = K_1 \Delta I + K_2 z \quad (9)$$

$$mz = F + F\delta \quad (10)$$

$$\Delta u = R_1 \Delta I \quad (11)$$

其中

$$K_1 = -\frac{\mu_0 N^2 A I_0}{\pi W_m \delta_0} \tan^{-1} \left(\frac{\Delta}{\delta_0} \right), \quad K_2 = -\frac{\mu_0 N^2 A I_0^2}{2\pi W_m (\delta_0^2 + \Delta^2)}$$

如果选取状态向量为 $X = [z \quad \dot{z}]^T$, 则系统的状态方程为:

$$\dot{X} = AX + B \Delta u \quad (12)$$

其是

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ K_2/m & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ K_1/(mR_1) \end{bmatrix}$$

本文采用线性二次最优控制法来设计系统(12)的控制器。给定性能指标

$$J = \int_0^{\infty} (X^T Q X + \Delta u^T R \Delta u) dt \quad (13)$$

式中, $Q \geq 0$ (非负定阵), $R > 0$ 。控制器为

$$\Delta u = KX \quad (14)$$

$$K = -R^{-1} B^T P \quad (15)$$

其中 P 为下述矩阵代数 Riccati 方程的解:

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (16)$$

如果采用侧向间隙传感器作为敏感元件,则对轨道的侧面的平直度有较高的要求,这将大大增加轨道造价。因此,这里考虑仅采用一个侧向加速度表作为敏感元件,系统的状态通过积分得到。但是,在弯道运行或随机干扰的均值不为零时,系统由于积分可能出现饱和问题。因此,这里提出衰减记忆控制法,即选取控制量为

$$\Delta u = \int_0^t \frac{d(KX(\tau))}{d\tau} e^{-\frac{t-\tau}{T}} d\tau \quad (17)$$

其中 T 为记忆时间常数。 T 的选择原则是:(1)控制量在合理的范围内;(2)尽可能大。

3 仿真研究

下面我们从系统的非线性模型出发,对导向控制的效果进行仿真,系统的结构参数和

有关常数选取为:

$$\begin{aligned} \pi &= 3.14 & g &= 9.8\text{m/s}^2 & \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} \\ N &= 320 & W_m &= 25\text{mm} & A &= 840\text{W}_m\text{mm} \\ \Delta &= 5\text{mm} & m &= 750\text{kg} & \delta_0 &= 10\text{mm} \end{aligned}$$

控制器参数选取为:

$$Q = \begin{bmatrix} 10^8 & 0 \\ 0 & 10^5 \end{bmatrix} \quad R = 1$$

3.1 闭环控制对侧向振动的控制作用

图 3(a) 是不施加控制的非线性仿真结果, 图 3(b) 和图 3(c) 是采用衰减记忆法的仿真结果。可以看出, 施加侧向控制能有效地衰减侧向振动, 如果记忆的时间较长, 则衰减效果更好一些。

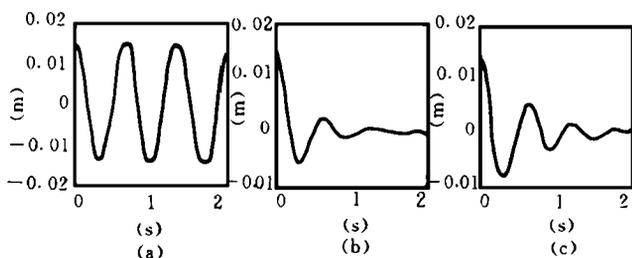


图 3 导向系统的阶跃响应

(a) 自稳定系统; (b) 衰减记忆控制, $T = 5$; (c) 衰减记忆控制, $T = 0.2$

3.2 闭环控制对导向力的影响

图 4 是侧向位移为 10mm 阶跃时, 闭环系统提供的导向力, 它是时间的函数。该图表明, 一旦出现侧向偏差, 系统能提供一个较大的导向力, 然后逐渐下降, 稳态值为开环导向力。这种力-位移特性表明比开环能承受更大的力干扰。图 5 中的曲线 1 是闭环最大导向力与位移的关系, 曲线 2 是开环导向力与位移的关系。

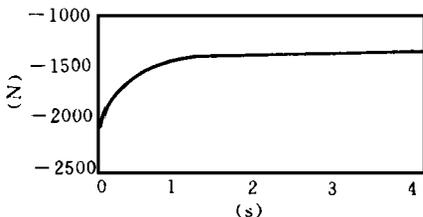


图 4 闭环系统导向力($z = 10\text{mm}$)

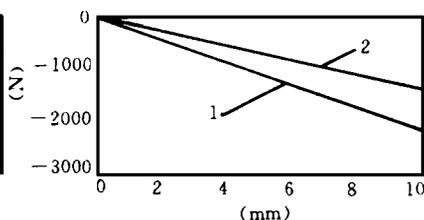


图 5 导向力与位移的关系

3.3 导向控制对纵向悬浮效果的影响

悬浮控制系统中存在导向控制作用时, 悬浮力变为

$$F_y = \frac{\mu_0 N^2 A I_1^2}{4\delta^2} + \frac{\mu_0 N^2 A I_2^2}{4\delta^2} \quad (18)$$

相对干扰力为:

$$\eta = \frac{F_y - 2mg}{2mg} \quad (19)$$

图 6 是侧向位移有 10mm 阶跃输入时,纵向悬浮力的相对变化($T = 0.2$),最大变化量为 18% 左右。悬浮间隙的变化曲线如图 7 所示,间隙的最大偏差不超过 0.5mm。可见,导向控制对纵向悬浮产生的干扰力可以被纵向悬浮控制系统克服。

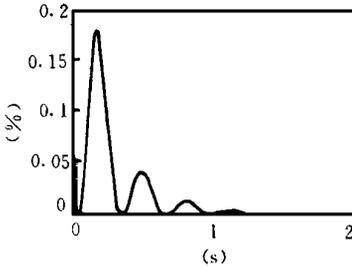


图 6 导向控制对悬浮力的影响

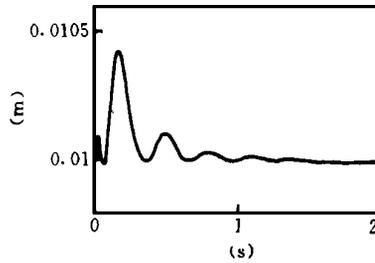


图 7 导向控制对悬浮间隙的影响

4 结论

本文从电磁铁的侧向力的公式出发,分析了模块结构 EMS 型磁浮列车中的一对相互错开的电磁铁的导向模型,利用侧向加速度信号实施主动控制,并采用衰减记忆法,以防止加速度积分造成的饱和。仿真结果表明:通过主动控制,可以增加侧向阻尼,减小侧向摆动;还可以提供较大的导向力,从而可以承受较大的侧向风力以及在弯道运行时提供一定的向心力;而导向控制对悬浮力产生的影响,悬浮控制系统可以克服。

参考文献

- 1 Hikasa Y, Takeuchi Y. Detail and Experimental Results of Fenomagnetic Levitation System of Japan Air Lines HSST-01-02 Vehicles. IEEE Trans on V. T, 1980, 29(1): 35 ~ 41
- 2 Gottzein E, Meisinger R, Miller L. The "Magnetic Wheel" in the Suspension of High-Speed Ground Transportation Vehicles. IEEE Trans on V. T, 1980, 29(1): 17 ~ 22
- 3 Suznki S, Kawashima M, Hosoda Y, Tanida T. HSST-03 System. IEEE Trans on Magnetics, 1984, 20(5): 1675 ~ 1677
- 4 尹力明. 磁悬浮列车支承电磁铁的侧向自稳定的原理分析. 机车电传动, 1996(6): 11 ~ 14
- 5 Sinha P K. Electromagnetic guspension: Dynamics and Contro; . IEE control engineering series, V. 30

(责任编辑 张静)