

EMS 磁浮列车的轨道共振和悬浮控制系统设计*

李云钢 常文森 龙志强

(国防科技大学自动控制系统 长沙 410073)

摘要 主要从悬浮控制系统设计的角度来解决磁浮列车的轨道共振问题,研究鲁棒状态观测器的设计,讨论观测器参数的选择方法。仿真和实验的结果表明,所设计的悬浮控制系统可以消除轨道共振,实现磁浮列车的稳定悬浮。

关键词 磁浮列车,磁悬浮控制,轨道共振,状态观测器

分类号 TP13

Guideway Resonance Vibration and Levitation Control System Design of an EMS Maglev Vehicle

Li Yungang Chang Wensen Long Zhiqiang

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

Abstract This paper tries to eliminate guideway resonance vibration of an EMS maglev vehicle by designing a levitation control system. It mainly deals with the design of a robust state-observer, discusses the selection method of the observer's parameters. Results of simulation and experiments indicate that the guideway resonance vibration in the system is eliminated successfully and the stable levitation is realized.

Key words maglev vehicle, magnetic levitation control, guideway resonance vibration, state-observer

磁浮列车在悬浮过程中容易出现轨道共振,这是国内外磁浮列车研制过程中出现的共同问题。为了从悬浮控制系统设计的角度来消除轨道共振,需要分析悬浮控制系统中阻尼信号的来源。一般来说,悬浮系统的阴尼主要源于悬浮间隙的微分和(或)电磁铁加速度的积分。由于加速度仅仅反映电磁铁的运动,而间隙可以同时反映电磁铁和轨道的运动,因此采用间隙微分作为阻尼来源更有利于消除轨道共振^[1]。另一方面,由于微分过程会带来噪声的放大,而积分过程则具有很强的抑制噪声的能力,因此,采用加速度作为阻尼来源可以使悬浮系统具有较强的干扰抑制能力。本文以一台单转向架磁浮列车为对象,同时测量悬浮间隙和电磁铁的加速度,并从这两种传感器信号出发,设计鲁棒状态观测器和相应的控制器。

1 悬浮模型和控制器设计

本文以单铁为对象来研究悬浮控制器的设计。假设已经采用了高速电流环,可得悬浮系统在 (δ_0, I_0) 附近的小范围线性化模型为:

$$u = RI, F = C_{FI} I - C_{F\delta} \delta, m\ddot{y} = -F + F_d \quad (1)$$

其中, $C_{FI} = \frac{\mu_0 N^2 A I_0}{2\delta_0^2}$, $C_{F\delta} = \frac{\mu_0 N^2 A I_0^2}{2\delta_0^3}$ 。

这里, m 是被控磁体的质量, A 为间隙处电磁铁铁芯的横截面积, N 是电磁铁线圈的匝数, R 为电流环的等效输入电阻, F 是电磁力和重力之和, F_d 为干扰力; δ_0 为额定悬浮间隙, I_0 为额定悬浮电流; y 为电磁铁的位移, u 为控制电压, I 为控制电流, δ 是悬浮间隙相对于额定间隙的偏差。注意,实际的悬浮间隙为 $\delta_0 + \delta$, 线圈中的实际电流为 $I_0 + I$ 。简单研究时,我们假设 $y = \delta$ 。

* 1998年7月3日收稿
第一作者: 李云钢, 男, 1969年生, 讲师

采用PD 控制器来实现稳定性控制,并引进加速度反馈以压缩系统的频带,可得:

$$u = K_P \delta + K_D \dot{\delta} + K_A \ddot{\delta} \tag{2}$$

联系上面各式,可得闭环系统为:

$$(m + C_{FI} K_A/R) \ddot{\delta} + (C_{FI} K_D/R) \dot{\delta} + (C_{FI} K_P/R - C_{F\delta}) \delta = F_d \tag{3}$$

以增大20%的等效质量作为加速度反馈的强度,并设所要求的闭环系统的角频率和阻尼分别为 ω 和 ξ_n ,可得:

$$\begin{aligned} m + (C_{FI}/R)K_A &= 1.2m \\ K_D - C_{FI}/(1.2Rm) &= 2\xi_n\omega \\ (K_P - C_{FI}/R - C_{F\delta})/(1.2m) &= \omega^2 \end{aligned}$$

于是,控制器的参数为:

$$\begin{aligned} K_P &= (1.2m\omega^2 + C_{F\delta}) R/C_{FI} \\ K_D &= 2.4m\xi_n\omega R/C_{FI} \\ K_A &= 0.2mR/C_{FI} \end{aligned} \tag{4}$$

2 鲁棒观测器设计

控制器(2)中要用到信号 δ ,而在系统实现时,这个信号不能直接量测。根据前面的分析,本文决定从悬浮间隙和电磁铁的加速度出发来获取这个信号,并通过观测器的设计来实现。为此构造系统:

$$\dot{X} = AX + Ba, \delta = CX \tag{5}$$

其中, $X = [\delta, \dot{\delta}]^T = [x_1, x_2]^T$ 为状态向量, a 为电磁铁的加速度,且

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0]$$

系统(5)反映的是位移、速度以及加速度之间的本质联系,这个系统是独立于悬浮控制系统的,因此,基于这个模型设计的观测器将具有很强的鲁棒性。

考察系统(5)可知, $[C, A]$ 能观测,设所设计的观测器为:

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + Ba + L(\delta - C\hat{X}) \tag{6}$$

选择观测器的极点 λ_1, λ_2 ,使得:

$$|sI - (A + LC)| = (s - \lambda_1)(s - \lambda_2) = s^2 + 2\xi_0\omega s + \omega^2$$

其中, ω 是观测器的特征频率, ξ_0 是观测器的阻尼。根据观测器的设计算法,可得 $L = [2\xi_0\omega, \omega^2]^T$,代入(6)式,可得观测器为:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 + 2\xi_0\omega(\delta - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= a + \omega^2(\delta - \hat{x}_1) \end{aligned} \tag{7}$$

由(7)式可得,观测器的状态图如图1所示。

3 观测器分析及其参数的选择

为了保证由观测器(7)得到的阻尼信号通过控制器(2)作用于系统后,系统具有较好的稳定性能,特别是可以克服轨道共振,需要仔细选取观测器的参数。下面进行分析。

将(7)式进行 Laplace 变换,并消去 $\hat{X}_1(s)$,可得:

$$\hat{X}_2(s) = G_{VA}(s) A(s) + G_{VP}(s) P(s) \tag{8}$$

$$其中: G_{VA}(s) = \frac{s + 2\xi_0\omega}{s^2 + 2\xi_0\omega s + \omega^2}$$

$$G_{VP}(s) = \frac{\omega^2 s}{s^2 + 2\xi_0\omega s + \omega^2}$$

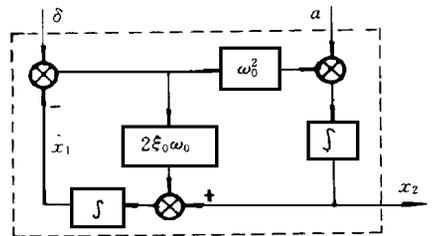


图1 观测器(7)的状态图
Fig. 1 State diagram for observer (7)

$A(s)$ 和 $P(s)$ 分别为加速度 $a(t)$ 和间隙 $\delta(t)$ 的 Laplace 变换。

从式(8)可以看出,速度的估计值是间隙 $P(s)$ 和加速度的 $A(s)$ 一种加权组合。而且可以看出, $G_{VA}(s)$ 在高频段是一个积分器,而 $G_{VP}(s)$ 在低频段是一个带滤波器的微分环节。可见,在高频段,阻尼主要来源于加速度的积分,而在低频段,阻尼主要来源于间隙的微分。定义间隙微分提供45°超前角的频率点为中间频率 ω_J ,联系到 $G_{VP}(s)$ 的表达式,可以得到 ω_J 满足如下的关系式:

$$\omega_J^2 + 2\xi_0\omega\omega_J + \omega^2 = 0 \tag{9}$$

根据 $G_{VA}(s)$ 的表达式可知,在中间频率 ω_J 点, $G_{VA}(\omega_J)$ 的滞后角为:

$$\theta_l = 45^\circ - \arctan \frac{\omega_J}{2\xi_0\omega}$$

为了保证在大于中间频率 ω_J 时, $G_{VA}(s)A(s)$ 能提供足够的阻尼分量,应保证 $\theta_l > 45^\circ$; 因此有 $\arctan \frac{\omega_J}{2\xi_0\omega} \ll 45^\circ$:

假设取 $\frac{\omega_J}{2\xi_0\omega} = \frac{1}{15}$, 联系(9)式,可得:

$$\omega = 4\omega_J, \xi_0 = 15/8 \tag{10}$$

中间频率 ω_J 应根据轨道共振的情况来选取,可以首先取 $\omega_J = \omega$,如果出现轨道共振,则增大 ω_J ,从而让间隙微分信号在较宽的频带内起作用;同时考虑到微分作用对噪声的放大效果, ω_J 不宜太大。

为了更灵活地设计观测器,可以将观测器调整为:

$$\hat{X}_2(s) = \eta G_{VA}(s) A(s) + (2 - \eta) G_{VP}(s) P(s), 0 < \eta < 2 \tag{11}$$

显然,当 $\eta = 1$ 时,观测器(11)就是观测器(8)。通过调整 η 的值,可以改变阻尼信号中的间隙信号和加速度信号所占的比重,使调试更加灵活。

采用观测器后,控制器(2)由下式实现:

$$u = K_P \delta + K_D \hat{x}_2 + K_A a \tag{12}$$

4 仿真、实验结果及结论

本文考察静止悬浮时,轨道、电磁铁和车厢三个层面的运动,将所设计的观测器和控制器作用于系统,进行仿真。仿真时,只考虑轨道的一阶模态,并设其特征频率为17Hz。假设电磁铁从20mm的间隙开始起浮,额定悬浮间隙为10mm,图2(a)、(b)、(c)分别示出了轨道、电磁铁和车厢的悬浮过程。从图中可以看出,轨道的初始振动很快得到衰减,电磁铁和车厢平稳地运动到额定位置。由于系统中采用观测器

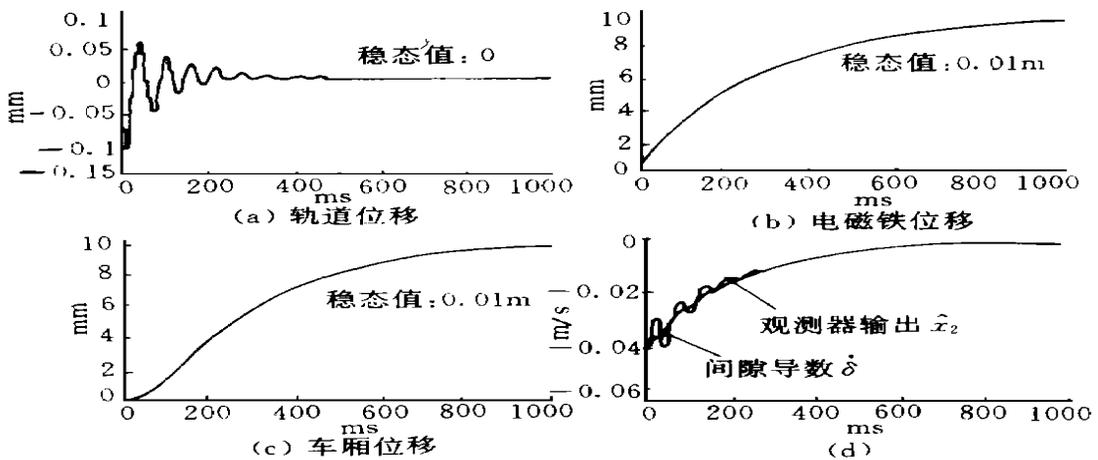


图2 悬浮系统运动的仿真结果

Fig. 2 Simulation results of levitation

的输出代替间隙导数,在仿真时,将这两种信号进行了比较,如图2(d)所示,可以看出观测器的输出和间隙导数基本一致,而在轨道存在高频振动的初始段,观测器的输出要平滑一些。图3是单转向架磁浮列车的实际测试结果。图3(a)是静态稳定悬浮时间隙的时间历程,图中信号的变化小于 $\pm 5\text{mV}$,对应的间隙变化是 $\pm 0.01\text{mm}$,相对于额定悬浮间隙的0.1%,可见具有良好的悬浮稳定性。图3(b)是图3(a)的频谱,几个尖峰频率点分别是:1.8Hz是系统中积分器的特征频率,4.8Hz是悬浮系统的特征频率,17Hz是轨道的基频。在静止悬浮条件下,给车体加一个冲击干扰,列车悬浮方向加速度的时间历程如图3(c)所示,可见干扰能迅速衰减。当列车在轨道上低速运行时,列车在悬浮方向的加速度变化曲线如图3(d)所示,其中,a、c分别为驱动电机的启动和停止点,b、b'为过轨道接缝点;开关电机以及过接缝时,相当于给系统施加了一个冲击干扰,能迅速衰减。整个系统不出现轨道共振。

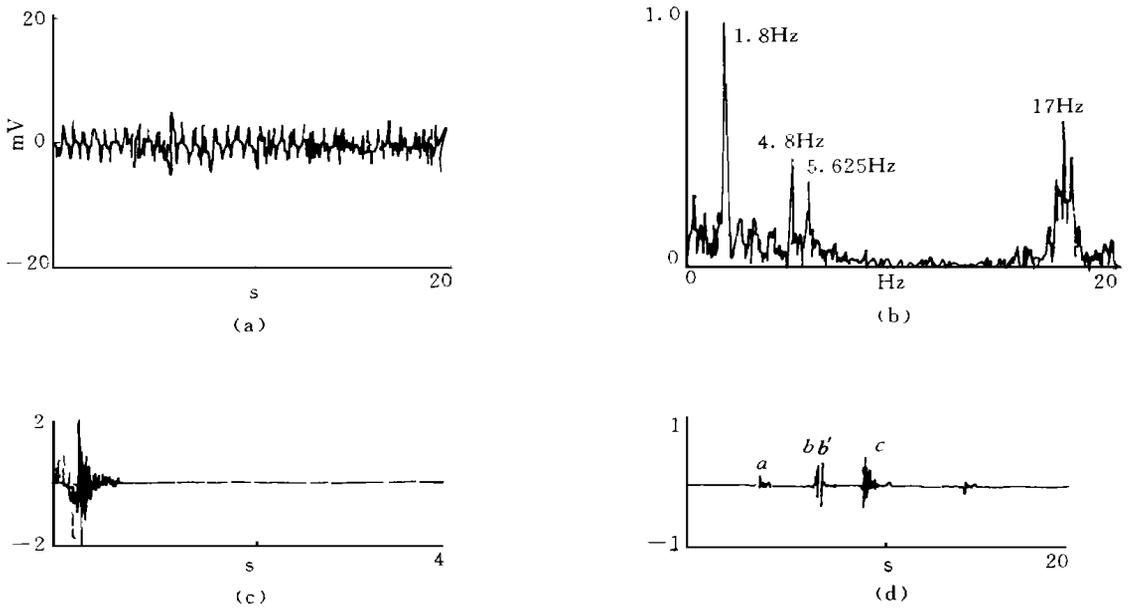


图3 磁浮列车的实测结果

Fig. 3 Experimental results of a single-bogie maglev vehicle

仿真和实验结果表明,从悬浮间隙和电磁铁的加速度两种信号出发,通过设计鲁棒观测器来获取阻尼,并实现磁浮列车的悬浮控制,可以有效地克服磁浮列车中容易出现的轨道共振,实现稳定悬浮。

参考文献

- 1 Gottzein E, Brock K H, Schneider E, Pfefferl J. Control aspects of a tracked magnetic levitation high speed test vehicle. Automatica, 1977, 13(3): 205 ~ 223