

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.10.017

磁悬浮列车过轨道台阶问题研究

林科文^{1,2}, 余龙华¹

(1. 国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073;
2. 中国人民解放军 75553 部队, 海南 五指山 572200)

摘要: 针对中低速磁浮试验线上轨道台阶引发列车激烈振动的现象, 提出一种有效抑制轨道台阶干扰的新思路。建立磁浮列车单电磁铁两点悬浮模块通过轨道台阶时的动力学模型, 对列车经过轨道台阶时传感器间隙和等效间隙的波动情况进行分析, 运用状态反馈控制算法, 分别将传感器测得间隙和计算得到的等效间隙用于反馈控制, 并进行动态特性仿真对比。结果表明, 这两种控制策略能反应出传感器和等效间隙的变化情况, 采用等效间隙反馈较好地抑制轨道台阶干扰带来的影响。

关键词: 轨道台阶; 磁浮列车; 两点模型; 等效间隙; 传感器间隙
中图分类号: N945.12; TP202 **文献标识码:** A

Research of Maglev System Running on Step Railway

Lin Kewen^{1,2}, She Longhua¹

(1. School of Electromechanical Engineering & Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. No. 75553 Unit of PLA, Wuzhishan 572200, China)

Abstract: Considering drastic vibration phenomena occurred in middle-low speed maglev test line with guide way step, a new control strategy for restraining the disturbance of guide way step effectively is presented. A dynamical two-point levitation model for single electromagnet module running on guide way step is built, and fluctuation of sensor gap and equivalent gap when running on guide way step is analyzed. By adopting state feedback control algorithm, sensor gap and equivalent gap are selected as feedback control variable respectively. Dynamical simulation results show that two control strategies can reflect the fluctuation of sensor gap and equivalent gap, and the control strategy with equivalent gap restrain the disturbance of guide way step effectively.

Keywords: guide way step; maglev train; two-point model; equivalent gap; sensor gap

0 引言

电磁型悬浮列车是对车载的、置于导轨下方的悬浮电磁体通过励磁而产生电场, 磁铁和轨道上的铁磁构件相互吸引, 将列车向上吸起悬浮于轨道上, 悬浮间隙一般为 8~12 mm^[1], 列车通过动态调节悬浮电磁铁的励磁电流使得电磁铁和轨道之间维持一个给定的悬浮间隙, 保证磁浮列车以一个相对轨道平稳的状态运行, 对轨道的精度要求很高。在实际线路中, 由于地基沉降、温差变化和轨道安装误差等因素, 轨道上可能会出现一定高度的轨道台阶, 特别是那些突变较大的台阶, 将直接影响到悬浮控制系统的稳定性。

在试验中发现: 当列车以不同的速度经过轨道台阶时, 运行速度越快, 振动越激烈。故结合 CMS-03 型磁浮列车的实际模型参数^[2], 建立单电磁铁模块两点悬浮模型通过轨道台阶时的动力学模型, 对列车通过轨道台阶时的等效间隙和传感器测

得间隙的波动情况进行分析, 并进行反馈控制和动态特性仿真, 以抑制轨道台阶干扰。

1 两点悬浮模型

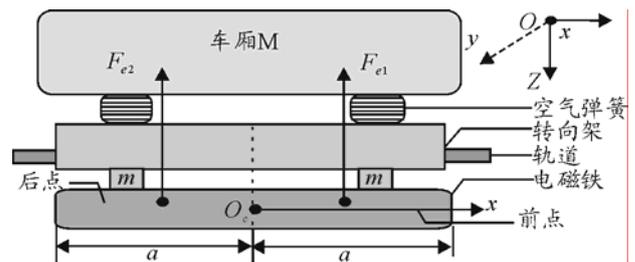


图 1 磁浮列车电磁铁两点模型

单电磁铁模块的两点悬浮模型^[2-3]如图 1, 假定:

- 1) 忽略绕组漏磁通 ($\phi_L=0$);
- 2) 忽略磁铁芯和导轨中的磁阻, 即认为磁势均匀降在气隙 $z(t)$ 上。簧上车厢质量: M ; 簧下单点质量 (包括转向架和电磁铁): m ; 电磁铁半段长度: a ; 簧下刚体质心原点: o_c ; 前后点电磁力: F_{e1} 、 F_{e2} ; 前后点电磁铁等

收稿日期: 2010-05-06; 修回日期: 2010-06-09

基金项目: 国家自然科学基金—静浮条件下磁浮列车的轨道弹性耦合振动控制研究 (60974128)

作者简介: 林科文 (1985-), 男, 海南人, 国防科技大学在读硕士, 从事悬浮控制研究。

效位移: z_1 、 z_2 ; 前后点控制线圈电流: i_1 、 i_2 ; 前后点磁路磁阻: R_1 、 R_2 ; 前后点气隙磁链 ψ_1 、 ψ_2 ; 前后点磁场能量 w_{m1} 、 w_{m2} ; 电磁铁线圈绕组匝数: N ; 铁芯极面积: A ; 记常系数 $c = \frac{\mu_0 N^2 A}{4}$ (μ_0 为空气磁导率)。根据悬浮系统原理^[2-4]和动力学分析^[5], 推导可得无扰动条件下, 单电磁铁模块两点悬浮模型的动力学方程如下:

$$\begin{cases} m \frac{d^2[z_1(t) + z_2(t)]}{dt^2} = (2m + M)g - F_{e1} - F_{e2} \\ \frac{2}{3}m \frac{d^2[z_1(t) - z_2(t)]}{dt^2} = F_{e1} - F_{e2} \\ u_1 = R_1 i_1(t) + \frac{2c}{z_1(t)} \frac{di_1(t)}{dt} - \frac{2ci_1}{[z_1(t)]^2} \frac{dz_1(t)}{dt} \\ u_2 = R_2 i_2(t) + \frac{2c}{z_2(t)} \frac{di_2(t)}{dt} - \frac{2ci_2}{[z_2(t)]^2} \frac{dz_2(t)}{dt} \\ F_{e1} = c \left[\frac{i_1(t)}{z_1(t)} \right]^2 \\ F_{e2} = c \left[\frac{i_2(t)}{z_2(t)} \right]^2 \end{cases} \quad (1)$$

根据式 (1) 可建立单电磁铁模块两点悬浮模型的非线性仿真模型。

2 等效间隙的计算

假设前后两端电磁铁传感器测得间隙是 $z_{s1}(t)$ 、 $z_{s2}(t)$, 质心运动加速度 a_c , 转动加速度 θ_c , 它们反映了整个单电磁铁模块的运动特性, 传感器测得间隙是随着它们动态变化的, 可直接计算得到:

1) 质心转动加速度和传感器测得间隙的关系:

$$\theta_c = \frac{\ddot{z}_{s1}(t) - \ddot{z}_{s2}(t)}{a} \quad (2)$$

2) 质心加速度和两端传感器侧得间隙的关系:

$$\ddot{z}_c = a_c = \frac{\ddot{z}_{s1}(t) + \ddot{z}_{s2}(t)}{2} \quad (3)$$

由式 (2)、式 (3) 可以求得:

$$\begin{cases} \ddot{z}_{s1}(t) = a_c + \frac{a}{2} \theta_c \\ \ddot{z}_{s2}(t) = a_c - \frac{a}{2} \theta_c \end{cases} \quad (4)$$

以上可得到传感器测得的悬浮间隙, 是实际系统中用于反馈环节进行控制悬浮间隙的一个参数, 但是用于计算电磁力和电流—电压方程的悬浮间隙是系统的等效间隙^[6], 即实际悬浮系统中的真实悬浮间隙。列车运行中等效间隙的变化是一个动态变化的过程, 很难根据几何关系和电磁铁质心运动参数直接计算得到, 但由于传感器的安装位置是固定

的, 测量结果能及时反映轨道的变化, 所以根据传感器测得的悬浮间隙和质心悬浮间隙计算可得到更接近真实的悬浮间隙, 计算过程如下: 假设电磁铁单点 1 前端在时间为 t_0 时刻经过一定高度的轨道台阶, 列车的行驶速度为 v , 电磁铁中心到轨道面的几何距离为 z_0 。整块电磁铁模块的等效悬浮间隙为 z_c , 整个电磁铁模块的悬浮磁场面积为 $S_{\text{总}}$, 轨道台阶高度为 z_g 。列车在过轨道台阶时的结构变化可分为 2 个阶段进行分析:

1) 单点 1 进入轨道台阶至完全经过轨道台阶

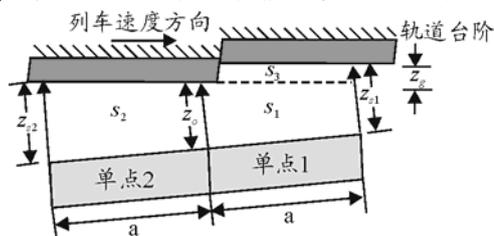


图 2 阶段 1 示意图

当 $t_0 < t \leq t_0 + \frac{a}{v}$ 时, 如图 2, 根据几何关系有:

$$z_0 = \frac{z_{s1} - z_g + z_{s2}}{2}, \text{ 单点 1 的悬浮磁场面积 } s_0 = s_1 + s_3,$$

其中, $s_1 = \frac{(z_0 + z_{s1} - z_g)a}{2}$, $s_3 = z_g v(t - t_0)$, 又单点 2 的

悬浮磁场面积为 $s_2 = \frac{(z_0 + z_{s2})a}{2}$, 整块电磁铁的悬浮磁

场面积为 $S_{\text{总}} = s_0 + s_2$, 通过计算可得到单点 1、2 的悬浮磁场面积为:

$$\begin{cases} s_0 = \frac{a(3z_{s1} + z_{s2} - 3z_g)}{4} + z_g v(t - t_0) \\ s_2 = \frac{a(z_{s1} - z_g + 3z_{s2})}{4} \end{cases} \quad (5)$$

最后得到该阶段单点 1、2 的悬浮等效间隙为:

$$\begin{cases} z_1 = \frac{s_0}{a} = \frac{3z_{s1} + z_{s2} - 3z_g}{4} + \frac{z_g v(t - t_0)}{a} \\ z_2 = \frac{s_2}{a} = \frac{z_{s1} + 3z_{s2} - z_g}{4} \end{cases} \quad (t_0 < t \leq t_0 + \frac{a}{v}) \quad (6)$$

2) 单点 2 进入轨道台阶至完全经过轨道台阶

单点 2 进入台阶的时间 $t = t_0 + \frac{a}{v}$, 当

$t_0 + \frac{a}{v} < t \leq t_0 + \frac{2a}{v}$, 电磁铁与轨道的结构图如图 3。

同理, 该阶段单点 1、2 的悬浮等效间隙为:

$$\begin{cases} z_1 = \frac{3z_{s1} + z_{s2} + z_g}{4} \\ z_2 = \frac{z_{s1} + 3z_{s2} - z_g}{4} + \frac{z_g v(t - (t_0 + \frac{a}{v}))}{a} \end{cases} \quad (t_0 + \frac{a}{v} < t \leq t_0 + \frac{2a}{v}) \quad (7)$$

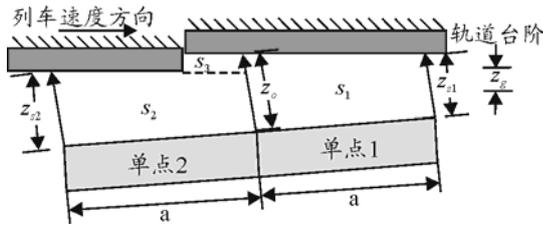


图 3 阶段 2 示意图

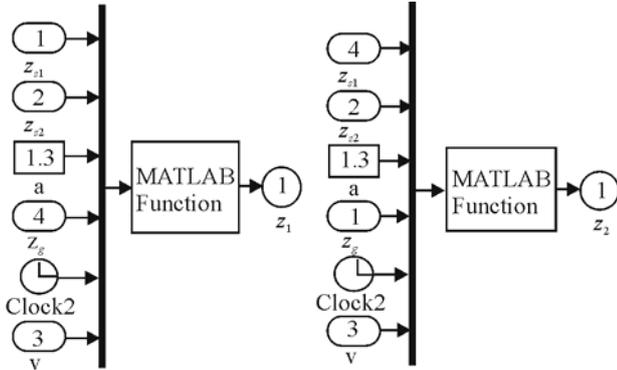


图 4 等效间隙计算仿真模块

由以上分析得到的式 (6)、式(7) 可得列车经过轨道台阶时 2 个阶段前后点等效间隙计算表达式, 用于模型仿真的框图和计算函数如图 4, 单点的等效间隙可由传感器 1 测得间隙、传感器 2 测得间隙、列车速度、半段电磁铁长度、时间和轨道台阶的高

度等变量确定的函数计算得到。

3 控制方法仿真分析

反馈控制环节采用基于状态反馈的控制策略^[7], 包含电流反馈、加速度反馈、间隙微分反馈、间隙反馈环节, 闭环控制电压为:

$$\begin{cases} u_1 = u_{ec1} + k_{i1}i_1 + k_{a1}\ddot{z}_1 + k_{p1}z_1 + k_{rv1}\dot{z}_1 \\ u_2 = u_{ec2} + k_{i2}i_2 + k_{a2}\ddot{z}_2 + k_{p2}z_2 + k_{rv2}\dot{z}_2 \end{cases} \quad (8)$$

其中, u_{ec} 为电磁铁初始静态电压, k_i 为电流反馈系数, k_a 为加速度反馈系数, k_p 为间隙反馈系数, k_{rv} 为间隙微分反馈系数。仿真中假设在 $t_0 = 2s$ 时刻出现一个抬高 1.5 mm 轨道台阶。

1) 根据以上分析得到悬浮模块过台阶时的等效间隙变化情况, 将计算得到的等效间隙用于电流—电压方程和电磁力计算方程, 传感器测得间隙用于反馈控制, 将轨道台阶的干扰叠加到传感器信号中去, 模型仿真图见图 5, 虚线部分为系统结构, 虚线部分以上为单点 1 控制部分, 虚线部分以下为单点 2 控制部分。图 5 中, z_{se} 表示系统的预期悬浮间隙, 仿真中设定为 10 mm。

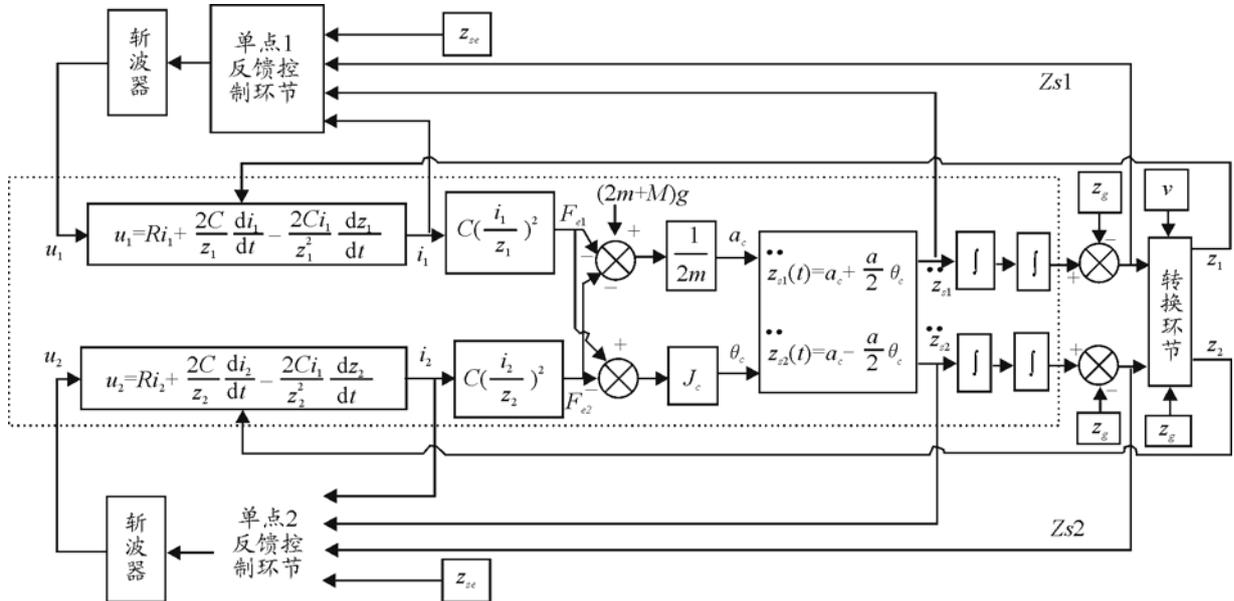


图 5 策略 1 模型仿真图

根据以上控制策略进行仿真, 图 6 表示列车以 10 km/h 和 30 km/h 的速度经过 1.5 mm 轨道台阶时的仿真曲线, 列车在 2 s 时前端传感器测得间隙突然增大 1.5 mm, 表示轨道台阶干扰, 前点的等效间隙在 2 s 一开始有一个很小的增量, 这是传感器进入轨道台阶后电磁铁还没来得及反应产生的增

量, 而后在控制作用下立即减小并随着传感器的测量值的变化规律变化。在这个过程中, 后点对台阶干扰不大, 传感器只有一个微小的调节过程, 但是等效间隙会在前点的固连结构作用下变小。在 2.5 s 左右, 电磁铁模块中点经过台阶, 前点的传感器和等效间隙受干扰影响不大, 传感器逐渐趋向于平衡

点, 但因为台阶的原因, 等效间隙会比预期间隙大一些, 而后点等效间隙会逐渐增大, 直到后点传感器进入轨道台阶。通过对比列车以不同速度通过相同轨道台阶时的仿真曲线可知: 随着速度越来越快, 模块前后点进入轨道台阶的时间间隔开始缩小, 在

一定的时间间隔以内, 后点在前点发生振动还没恢复到稳定状态时就发生了突变振动, 在相互耦合作用下会发生近似于正弦波形振荡, 导致模块振动越激烈。当过台阶的时间间隔很小时, 可忽略一定高度的轨道台阶的影响。

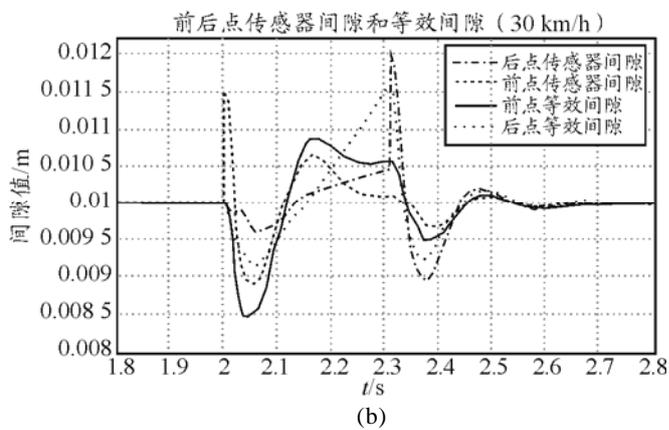
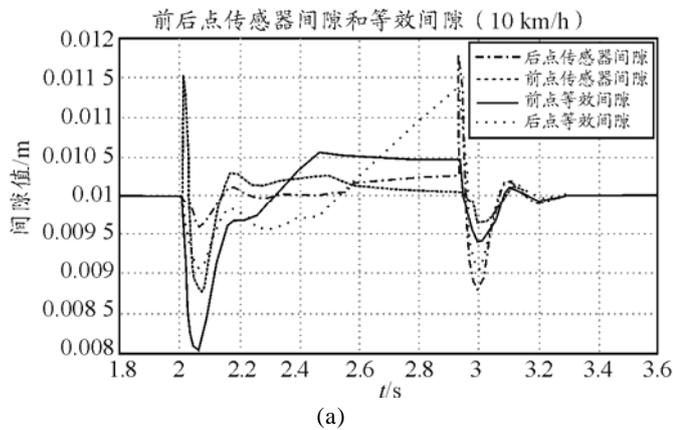


图 6 前后点传感器间隙和等效间隙变化曲线

2) 以上的仿真是将传感器检测得到的间隙信号直接用于反馈控制环节, 从仿真结果可以看出: 该反馈控制能真实地描述出传感器和等效间隙的变化规律, 但是控制效果不太好, 传感器信号和等效

间隙幅值波动比较大。下面将通过传感器信号计算得到的等效间隙用于反馈控制环节进行仿真分析, 对控制参数进行微小调整后得到的仿真结果如图 7、图 8。

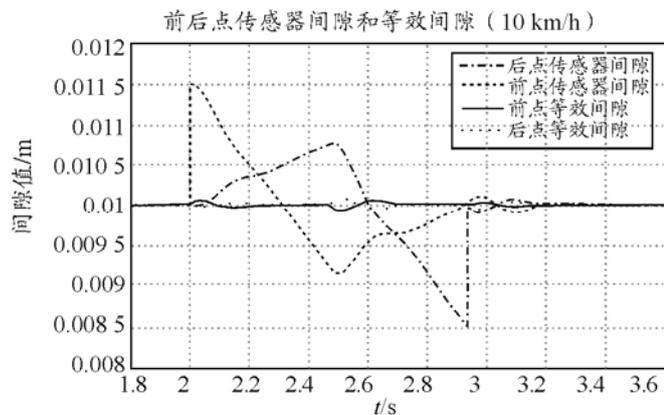


图 7 前后点传感器和等效间隙变化曲线

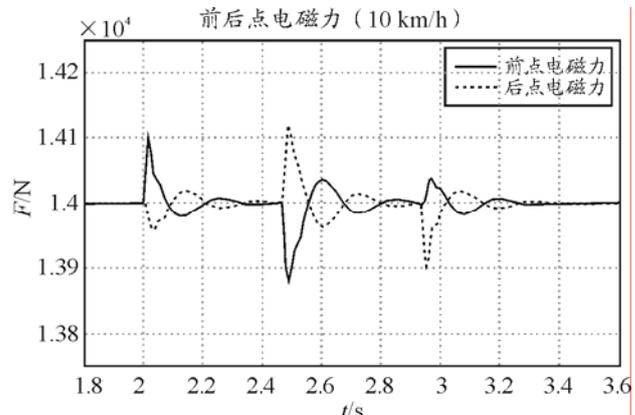


图 8 电磁力变化曲线

仿真结果显示: 该控制策略能够反应出传感器和等效间隙的变化情况, 控制效果较以前有了很大的改观, 传感器间隙和等效间隙的波动范围很小, 电磁力的变化幅值较策略一有所减小, 总体上能够抑制轨道台阶干扰带来的影响。

4 结束语

仿真结果证明, 将等效间隙应用于反馈控制环节能够抑制轨道台阶带来的振动现象, 为下一步研究如何更好的抑制由轨道台阶引起的振动现象提供了一种新思路。

参考文献:

- [1] 吴祥明. 磁浮列车[M]. 上海: 上海科技出版社, 2003.
- [2] 张银. 磁浮列车悬浮系统的数字控制技术[D]. 长沙: 国防科技大学博士论文, 2004.
- [3] 刘德生, 李杰, 常文森. EMS 型磁浮列车模块的运动耦合研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(3): 22-26.
- [4] 余龙华, 柳贵东. 单铁磁悬浮控制系统的动力学特性研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2006, 29(3): 17-19.
- [5] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [6] 磁浮列车关键技术研究—悬浮与导向系统综合报告[R]. 长沙: 国防科技大学磁悬浮中心内部报告, 1996.
- [7] 周富民. 考虑轨道若干因素的悬浮控制研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.