

9-2-2020

Research of Maglev Train Dynamics Simulation Based on Levitation Control Algorithm

Songqi Li

Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Maglev Vehicle, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

Kunlun Zhang

Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Maglev Vehicle, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Research of Maglev Train Dynamics Simulation Based on Levitation Control Algorithm

Abstract

Abstract: A dynamics model for a whole section of the EMS maglev train was built based on MATLAB, the model described the relationship among body - levitation frame - elastic track and had four degrees of freedom. It simulated and analyzed the vehicle-track coupled vibration dynamic behavior while the vehicle passing the elastic tracks at 200 km/h, using three different kinds of control algorithms respectively. The simulation results show that *under the condition of a certain speed and fixed vehicle-track physical parameters, the dynamics behaviors of body - levitation frame - track are obviously different by adopting different control algorithm, and the safety and comfort of maglev vehicle is contradict with each other. The ideal suspension controller algorithm should increase comfort as much as possible under the guarantee for safety.* And at the same time, by improving the levitation controller algorithm, the dynamic performance of system in the process of coupled vibration can be enhanced. The study is valuable as reference for optimizing the maglev train levitation controller design.

Keywords

maglev vehicle, vehicle-track coupled vibration, levitation controller, dynamics simulation

Recommended Citation

Li Songqi, Zhang Kunlun. Research of Maglev Train Dynamics Simulation Based on Levitation Control Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(1): 179-184.

基于悬浮控制算法的磁浮列车动力学仿真研究

黎松奇, 张昆仑

(西南交通大学磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室, 成都 610031)

摘要: 使用 MATLAB 建立了 EMS 型磁浮列车一节完整车厢的动力学模型, 模型描述了车体-悬浮架-弹性轨道之间的关系, 并具有 4 个自由度。仿真分析了车辆以 200 km/h 速度通过弹性轨道, 当悬浮控制器分别采用 3 种不同的控制算法时车-轨耦合振动的系统动力学行为。仿真结果表明, 在一定速度以及固定的车辆-轨道物理参数条件下, 悬浮控制器采用不同的控制算法, 车体-悬浮架-轨道各自的动力学行为有明显差异, 磁浮列车的安全性与舒适性互相矛盾。理想的悬浮控制器算法应该在保证列车安全性的前提下, 尽可能提高舒适性, 同时通过改良悬浮控制算法可以提高车-轨耦合振动过程中系统的动态性能。此研究对于完善磁浮列车悬浮控制器设计具有参考价值。

关键词: 磁悬浮列车; 车-轨耦合振动; 悬浮控制器; 动力学仿真

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 01-0179-06

Research of Maglev Train Dynamics Simulation Based on Levitation Control Algorithm

Li Songqi, Zhang Kunlun

(Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Maglev Vehicle, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A dynamics model for a whole section of the EMS maglev train was built based on MATLAB, the model described the relationship among body - levitation frame - elastic track and had four degrees of freedom. It simulated and analyzed the vehicle-track coupled vibration dynamic behavior while the vehicle passing the elastic tracks at 200 km/h, using three different kinds of control algorithms respectively. The simulation results show that *under the condition of a certain speed and fixed vehicle-track physical parameters, the dynamics behaviors of body - levitation frame - track are obviously different by adopting different control algorithm, and the safety and comfort of maglev vehicle is contradict with each other. The ideal suspension controller algorithm should increase comfort as much as possible under the guarantee for safety.* And at the same time, by improving the levitation controller algorithm, the dynamic performance of system in the process of coupled vibration can be enhanced. The study is valuable as reference for optimizing the maglev train levitation controller design.

Keywords: maglev vehicle; vehicle-track coupled vibration; levitation controller; dynamics simulation

引言

EMS 型磁悬浮列车在轨道上运行时, 为产生



作者简介: 黎松奇(1980-), 男, 四川峨眉人, 博士生, 讲师, 研究方向为磁浮车辆动力学与控制; 张昆仑(1964-), 男, 四川成都人, 硕士, 教授, 博导, 研究方向为电力电子与电力传动。

收稿日期: 2014-01-02 修回日期: 2014-03-13

基金项目: 教育部重点实验室建设项目(2682013ZT18); 西南交通大学青年教师百人计划(SWJTU2011BR052EM)

悬浮力, 电磁铁中流过受控电流产生电磁吸力, 该电磁吸力会使轨道产生弹性形变, 影响车体的悬浮气隙。由于 EMS 型磁浮列车额定悬浮气隙通常较小, 而且当车辆速度越快, 轨道形变会越大, 所以轨道的弹性形变引起的耦合振动对于磁浮车-轨系统的影响不可忽略^[1-2]。

国内外对此问题已经有了很多研究, 其中集中

质量的单磁铁模型较容易得出磁浮系统的动力学解析公式，可以分析系统的原理^[3-5]。但是实际车辆沿轨道梁运动时系统动态响应是一个复杂的多点激励耦合振动，其难以用解析公式表示，或难以得到能清晰描述系统特性的解析解，所以对于车体-轨道在运动过程中的动力学行为研究，多采用数值仿真的方式^[6-11]。

众多文献中讨论车-轨耦合振动过程中系统动力学以及结构动力学的很多，但是这些研究的结论往往是在某种特定的车辆控制算法下得出的，磁浮车-轨系统在不同的控制算法下的动力学特性讨论未见报道。本文针对这一问题，建立了一节完整车厢的车体-悬浮架-弹性轨道 4 自由度系统模型，仿真分析了系统物理参数固定情况下，车辆匀速通过弹性轨道时车辆悬浮控制器分别采用 3 种不同的控制算法，系统的动力学行为，讨论了悬浮控制算法不同对于系统动力学性能的影响。

1 车轨系统的模型

1.1 车辆动力学方程

本文采用某 EMS 型磁浮车的简化模型，将车

体视为刚体，且结构对称。由图 1 所示，一节车厢的车体被 5 个悬浮架通过 20 个空气弹簧支撑（编号 1~20），每个悬浮架由 2 套悬浮臂和 2 套抗侧滚梁组成一体，每套悬浮臂安装有 2 个独立控制的电磁铁线圈，一节车厢共有 20 个悬浮电磁铁（编号 1~20）。为分析系统的垂向振动动力学行为，本文考虑车体和每个悬浮架沉浮，点头，侧滚，纵向运动 4 个自由度。具体的运动方程在式(1)~(6)中描述。其中： m_1 表示车体质量； m_2 表示悬浮架质量； z_{1n} 表示编号为 n 的空气弹簧处车体绝对位移； z_{2n} 表示编号为 n 的空气弹簧处悬浮架绝对位移； c_1 表示空气弹簧阻尼； k_1 表示空气弹簧刚度； c_2 表示抗侧滚梁阻尼； k_2 表示抗侧滚梁刚度； f_{en} 表示编号为 n 的电磁铁产生的电磁力； J_1 和 J_2 分别表示车体点头和侧滚的转动惯量； J_3 和 J_4 表示悬浮架点头和侧滚的转动惯量； β_1 和 α_1 表示车体点头和侧滚方向的角加速度； β_2 和 α_2 表示悬浮架点头和侧滚方向的角加速度； x_n 和 y_n 表示相应点处作用力臂的长度。模型中变量的选取方法如图 2(单个悬浮架和车体垂直于 y 方向的侧面图)所示。

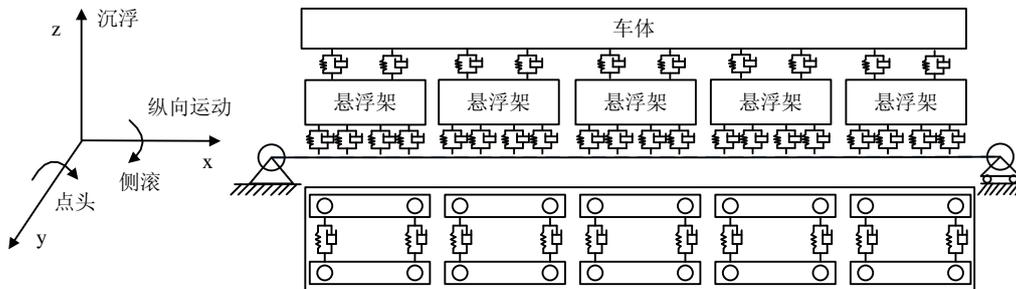


图 1 车辆-轨道动力学模型

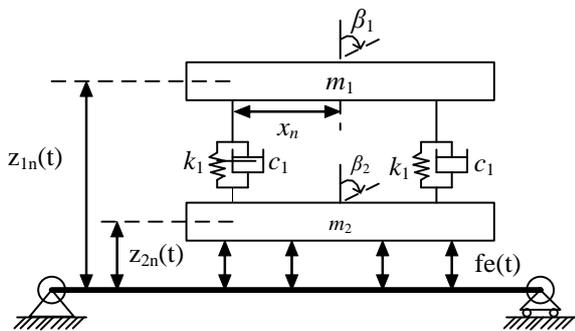


图 2 模型侧面示意图

车体沉浮：

$$m_1 z_1'' + c_1 \sum_{n=1}^{20} (z_{1n}' - z_{2n}') + k_1 \sum_{n=1}^{20} (z_{1n} - z_{2n}) = 0 \quad (1)$$

车体点头：

$$c_1 \sum_{n=1}^{20} (z_{1n}' - z_{2n}') x_n + k_1 \sum_{n=1}^{20} (z_{1n} - z_{2n}) x_n = J_1 \beta_1 \quad (2)$$

车体侧滚：

$$c_2 \sum_{n=1}^{20} (z_{1n}' - z_{2n}') y_n + k_2 \sum_{n=1}^{20} (z_{1n} - z_{2n}) y_n = J_2 \alpha_1 \quad (3)$$

单个悬浮架沉浮:

$$m_2 z_2'' + c_1 \sum_{n=1}^4 (z_{2n}' - z_{1n}') + k_1 \sum_{n=1}^4 (z_{2n} - z_{1n}) - \sum_{n=1}^4 f e_n = 0 \quad (4)$$

单个悬浮架点头:

$$c_1 \sum_{n=1}^4 (z_{1n}' - z_{2n}') x_n + k_1 \sum_{n=1}^4 (z_{1n} - z_{2n}) x_n + \sum_{n=1}^4 f e_n x_n = J_3 \beta_2 \quad (5)$$

单个悬浮架侧滚:

$$c_2 \sum_{n=1}^4 (z_{1n}' - z_{2n}') y_n + k_2 \sum_{n=1}^4 (z_{1n} - z_{2n}) y_n + \sum_{n=1}^4 f e_n y_n = J_4 \alpha_2 \quad (6)$$

1.2 电磁力方程

对于单磁铁, 其电磁力计算公式可表示为:

$$f e(t) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i(t)}{c(t)} \right)^2 \quad (7)$$

$$u(t) = R i(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2c(t)} i'(t) - \frac{\mu_0 N^2 A i(t)}{2c^2(t)} c'(t) \quad (8)$$

其中: R 表示电磁线圈电阻; N 表示线圈匝数; A 表示有效面积; μ_0 表示真空磁导率; c 表示悬浮气隙。

1.3 轨道动力学方程

轨道梁的模型采用磁悬浮系统中广泛使用的 *Euler-Bernoulli* 方程描述。因为轨道梁的高阶振型在车轨耦合振动中影响较小^[6], 所以在仿真中只考虑梁的前 3 阶振型, 具体的轨道振动方程如下:

$$\ddot{q}_n(t) + 2\varepsilon_n w_n \dot{q}_n(t) + w_n^2 q_n(t) = \frac{P_n(t)}{M_n} \quad (9)$$

$$P_n(t) = \int_0^l p(x, t) \cdot \phi_n(x) dx \quad (10)$$

$$h(x, t) = \sum_{m=1}^3 \phi_m(x) \cdot q_m(t) \quad (11)$$

公式(9)由 *Euler-Bernoulli* 方程根据振型的正交性推导得出, 式中: $P_n(t)$ 表示广义荷载; M_n 表示广义质量; ϕ_n 表示轨道梁的第 n 阶模态; ρA 代表轨道梁的线密度; $w_n = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$ 是轨道梁的 n 阶特征频率; ε_n 为轨道梁的第 n 阶阻尼比; h 表示轨道的位移。

2 数值仿真及分析

2.1 仿真参数及说明

本文采用 Matlab 的 m 语言配合 Simulink 工具箱进行车-轨振动数值仿真。选用某磁浮线的主要参数如下: 车体质量=10 000 kg, 车体长度=15 m, 车体宽度=3 m, 悬浮架长度=2.5 m, 悬浮架宽度=2 m, 悬浮架质量= 700 kg, 磁铁有效面积= 0.023 5 m², 轨道线密度=5 000 kg m⁻¹, 轨道阻尼= 0.01, 轨道长度 = 24.8 m, 轨道抗弯刚度= 2.43e+10 N m², 额定悬浮间隙= 0.008 m, 空气弹簧刚度=50 000 N m⁻¹, 空气弹簧阻尼=10 000 N s m⁻¹, 抗侧滚梁刚度=50 000 N m⁻¹, 抗侧滚梁阻尼=7 000 N s m⁻¹。仿真计算中的各物理量的计算关系如图 3 所示。

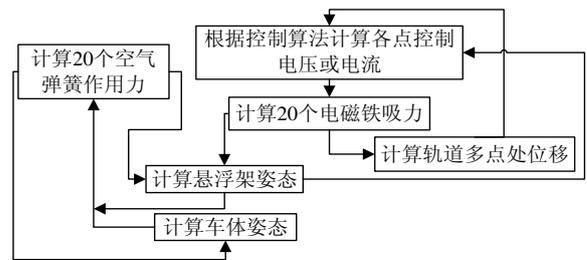


图 3 仿真计算关系

2.2 仿真算法

本文中悬浮控制器选用 3 种原理各不相同的控制算法, 仿真研究系统的动力学行为的差异。其中线性电流反馈控制是在工程中实际广泛使用一种算法; 模型参考自适应控制在系统运行的过程当中, 能够根据反馈不断的修正其控制参数; 非线性系统反馈线性化是一种较为理想化的控制算法, 其具体实现依赖于系统状态的反馈, 但现实中系统的内部状态往往难以观察。这 3 种控制算法的选取从实际工程应用到自适应自修正再到理想化的控制, 能代表大多数的磁浮车辆控制算法。被选用的控制算法工作原理及其参数选取的依据简单说明如下。

(1) 线性电流反馈控制

将磁浮系统在平衡点处线性化, 悬浮控制器选择气隙, 气隙变化速度, 悬浮架加速度作为反馈控制量, 控制电流表示为:

$$i(t) = i_0 + k_p \Delta c + k_v \Delta c' + k_a \Delta z'' \quad (12)$$

其中加速度反馈系数 k_a 起增大悬浮架惯性的作用, 气隙变化速度反馈系数 k_v 起调节悬浮阻尼的作用, 气隙反馈系数 k_p 关系着悬浮系统刚度。本文仿真中根据经验值选取控制器参数为 $k_a=20$, $k_v=500$, $k_p=80000$ 。

(2) 模型参考自适应控制

选取如图 4 所示的模型参考自适应控制方案, 其中: r 是参考输入; Y_m 是参考模型输出; Y_s 是系统输出; K 为可调节的控制增益, 由乘法器和积分器组成。取性能指标 $J = \frac{1}{2} \int e^2(t) dt$, 利用梯度寻优法求 K 使指标 J 取极小 (表示系统输出广义误差取极小), 从而得到增益 K 的调节规律。

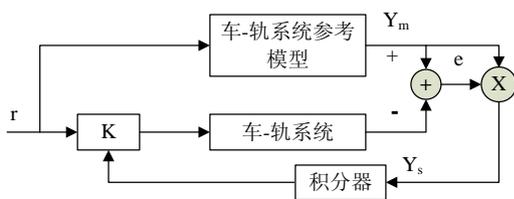


图 4 模型参考自适应控制方案

(3) 非线性系统反馈线性化控制

采用逆系统方法^[12]对车-轨系统非线性方程的输出做微分处理, 选取系统 $\varphi-u$ 作为前馈控制, 在其作用下, 系统变为伪线性系统。采用具有鲁棒性的伺服控制器对伪线性系统进行综合, 控制系统的结构如图 5 所示。图中 x 表示参考输入, K 表示

需要选取的系统反馈控制系数, 虚线框内是反馈线性化后得到的伪线性系统。本文中按文献[12]中的方法, 将系统传递函数的动态性能设计为等价于理想二阶系统的动态性能 (取阻尼系数 $\zeta=0.7$, 超调量为 5%, 过渡时间为 1.2 s), 通过系统对应的传递函数求出控制器 $T(s)$ 和 K 相应的参数取值。

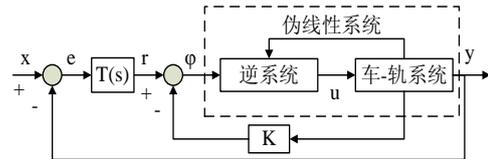


图 5 带有鲁棒性的逆系统控制方案

2.3 仿真及分析

为了模拟轨道被充分激振后车-轨耦合振动的情况, 模型如图 1 中的车辆不断的经过同一段轨道梁, 即车头离开轨道末端后又立刻进入轨道首端, 主要考虑轨道振动对于列车的影响, 忽略轨道之间间隙等干扰因素。由于车辆反复经过轨道, 取车头处车体和悬浮架的位移衡量整节列车的动态性能, 取轨道中心点振动情况衡量轨道的动态性能。仿真中开始时车体的重心位于轨道的中心, 在 $t=0$ 时刻起浮并以 200 km/h 的速度在轨道上运行。

仿真结果图中横坐标为时间(单位 s), 纵坐标为位移(单位 m), 因为车辆起浮时冲击较大, 本文取系统振动稳定后的数据(7~10 s)分析。图 6~8 分别是车体, 悬浮架气隙, 轨道中心处随时间变化的位移。

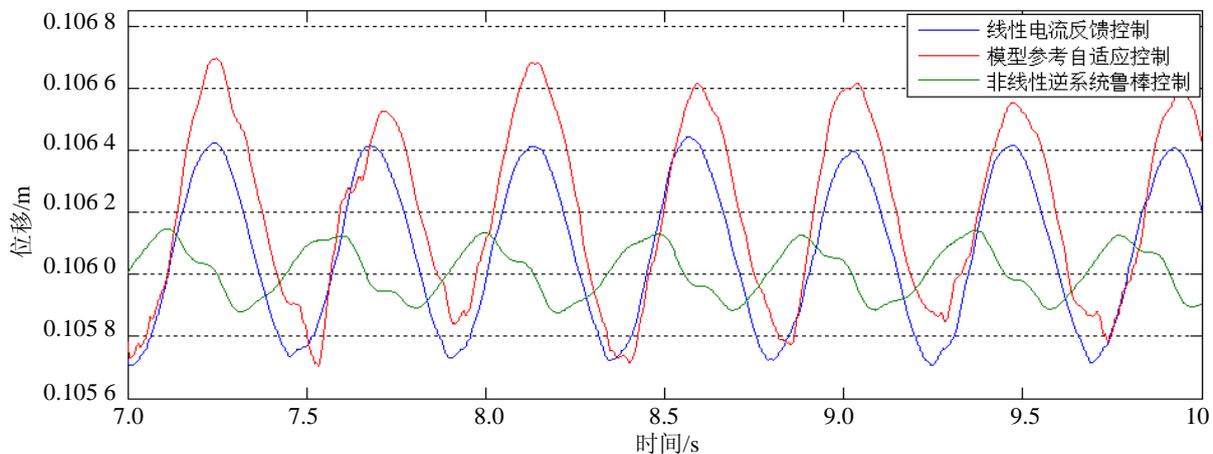


图 6 车体位移

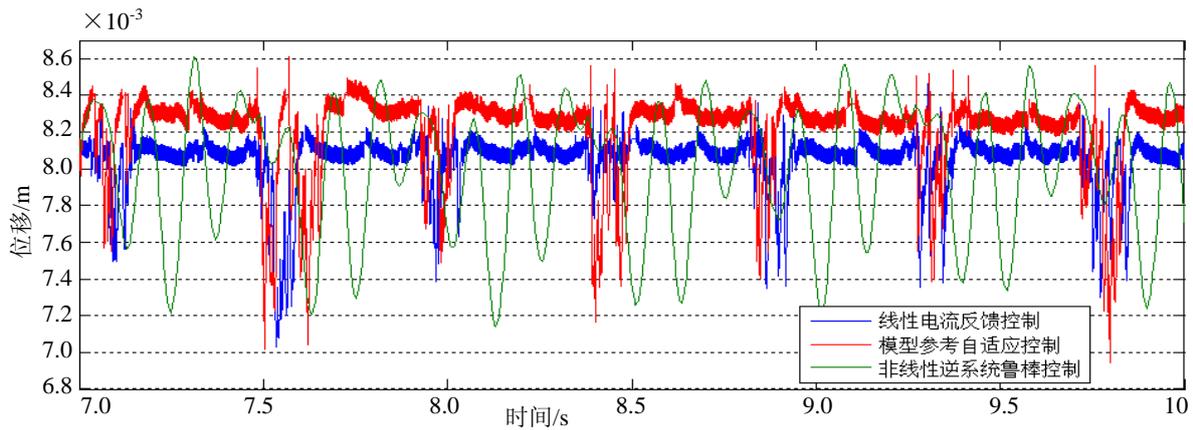


图 7 悬浮架气隙位移

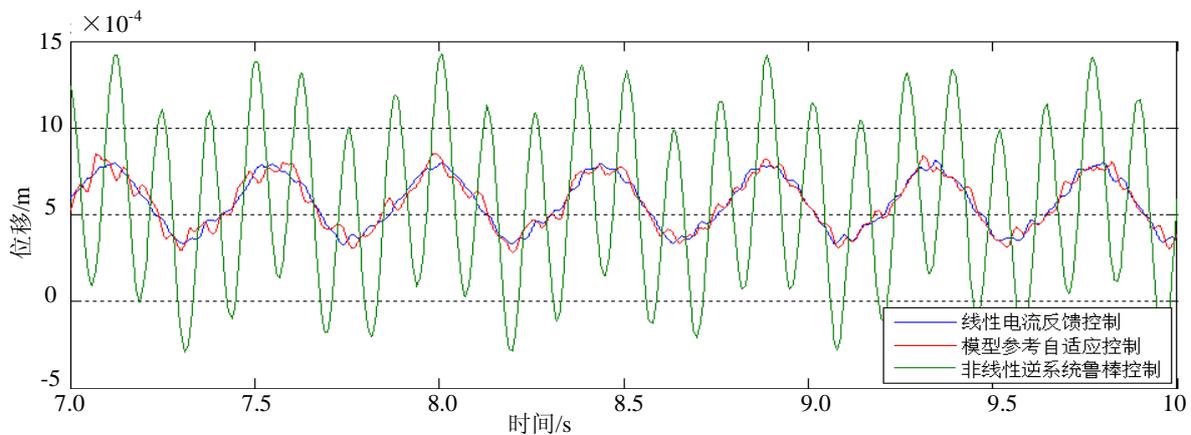


图 8 轨道中心点位移

当悬浮控制器采用 3 种不同控制方式时系统振动情况统计数据如表 1 所示。从位移曲线以及统计数据的均值方差我们可以看出:

- (1) 车体振动情况:
自适应控制>电流反馈控制>逆系统鲁棒控制。
- (2) 悬浮架振动情况:
逆系统鲁棒控制>自适应控制>电流反馈控制。
- (3) 轨道振动情况:
逆系统鲁棒控制>电流反馈控制>自适应控制。

由表 1 数据分析可知, 当车辆通过轨道, 轨道弹性形变造成悬浮气隙变化时, 由于 EMS 型磁浮列车气隙较小, 所以控制算法必须快速调整悬浮架位置, 使气隙维持恒定, 这个悬浮架的跟随动作必然导致悬浮架和车体上下振动, 其振动的程度与控制算法维持气隙恒定的能力有关。维持气隙的能力越强(悬浮刚度越大), 悬浮架位移就能越好的跟随

轨道位移而变化, 振动会越大; 反之维持气隙恒定的能力越弱(悬浮刚度越小), 则振动越小, 但是悬浮刚度变小则车辆安全性下降。这里可以看出车辆的舒适性与安全性相矛盾。悬浮控制器算法一个较理想的效果是在能保证安全性的前提下, 使悬浮架以适当的能力维持气隙, 即不以最快的速度跟随轨道弹性形变。

表 1 振动幅值与方差统计

	振幅均值/m	振幅方差/m ²
电流反馈控制车体	1.061e-1	5.94e-8
自适应控制车体	1.062e-1	8.35e-8
逆系统控制车体	1.060e-1	6.85e-9
电流反馈控制悬浮架	8.00e-3	2.58e-8
自适应控制悬浮架	8.20e-3	5.43e-8
逆系统控制悬浮架	8.00e-3	1.24e-7
电流反馈控制轨道	5.72e-4	2.30e-8
自适应控制轨道	5.72e-4	2.39e-8
逆系统控制轨道	5.74e-4	2.24e-7

3 结论

综上所述, 本文得到以下结论: 采用不同的悬浮控制器算法, 车体-悬浮架-轨道振动各不相同, 系统动态性能差异可能很大。对于悬浮控制器而言, 磁浮列车运行中安全性与舒适性相矛盾。如何确保安全性的同时尽可能的提高车辆舒适性, 或者根据情况取一些折衷, 是悬浮控制器设计时需要考虑的问题, 结论可供悬浮控制器算法设计参考。

参考文献:

- [1] 翟婉明, 赵春发. 磁浮车辆/轨道系统动力学(I)—磁/轨相互作用及稳定性 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(7): 1-10.
- [2] 李莉, 孟光. 电磁型磁悬浮列车动力学研究综述 [J]. 铁道学报, 2003, 25(4): 110-114.
- [3] 李云刚, 常文森, 龙志强. EMS 磁浮列车的轨道共振和悬浮控制系统设计 [J]. 国防科技大学学报, 1999, 21(2): 93-96.
- [4] 施晓红, 龙志强. 磁悬浮车轨耦合控制系统的非线性振动特性分析 [J]. 铁道学报, 2009, 31(4): 38-42.
- [5] 洪华杰, 李杰, 张猛. 磁浮车轨耦合系统稳定性分析 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23(3): 421-428.
- [6] 曾佑文, 王少华, 张昆仑. EMS 磁浮列车-轨道垂向耦合动力学研究 [J]. 铁道学报, 1999, 21(2): 27-33.
- [7] 赵春发, 翟婉明, 叶学艳. 高速磁浮车辆弹性悬浮架

动力学建模与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(20): 5718-5721. (Zhao Chunfa, Zhai Wanming, Ye Xueyan. Dynamic Modeling and Simulation of High-speed Maglev Vehicle and Its Elastic Levitation Chassis [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2008, 20(20): 5718-5721.)

- [8] 梁鑫, 罗世辉, 马卫华, 等. 磁浮列车单铁悬浮车桥耦合振动分析 [J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(2): 32-37.
- [9] 时瑾, 魏庆朝, 招阳. 弹性轨道上二自由度磁浮车辆动力学仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(3): 519-523. (Shi Jin, Wei Qingchao, Zhao Yang. Dynamic Simulation of Maglev with Two Degree on Flexible Guideway [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2007, 19(3): 519-523.)
- [10] 宋晓东, 吴定俊, 李奇. 移动均布荷载作用下弹性支撑筒支梁动力系数变化规律研究 [J]. 工程力学, 2013, 30(4): 281-287.
- [11] 程虎, 李云钢, 常文森. 电磁型磁浮列车的依从控制方法分析与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4756-4758. (Cheng Hu, Li Yungang, Chang Wensen. Analysis and Simulation of Compliance Control in EMS Maglev Train [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2009, 21 (15): 4756-4758.)
- [12] 李春文, 冯元琨. 多变量非线性控制的逆系统方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.

(上接第 178 页)

- [6] 张志勇, 吴剑强, 杨玉庆. 正压浓相恒压输送系统的 DCS 控制设计及应用 [J]. 发电与空调, 2012, 33(2): 5-9.
- [7] 李浩. 气动波纹管式燃油流量调节阀控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 14-21.
- [8] 胡志强, 郑海婷, 陈寇忠. 压风机恒压自动控制系统的设计与实现 [J]. 煤矿机械, 2012, 33(6): 241-243.
- [9] 杨伦, 谢一华. 气力输送工程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

- [10] 周武能, 田林林. 基于模糊 PID 算法的无线分布式温度控制系统 [J]. 控制工程, 2014, 21(3): 309-314.
- [11] 胡源, 牛玉刚, 贾廷刚. 一种自适应 PI—模糊切换策略的无线网络拥塞控制机制 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(3): 596-600.
- [12] 刘志壮, 洪添胜, 李震, 等. 基于模糊控制的流量控制阀仿真 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 83-85.
- [13] 张聚. 基于 MATLAB 的控制系统仿真及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.