

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.10.016

## 磁悬浮列车跟踪竖曲线的扰动因素分析

魏亮<sup>1</sup>, 余龙华<sup>1</sup>, 周富民<sup>2</sup>, 周建航<sup>3</sup>

(1. 国防科学技术大学 磁悬浮技术研究中心, 湖南 长沙 410073; 2. 中国人民解放军 61902 部队, 四川 宜宾 644000; 3. 白城兵器试验中心, 吉林 白城 137000)

**摘要:** 针对磁悬浮列车的竖曲线跟踪问题, 建立单点磁悬浮轨道跟踪模型。分析磁悬浮列车通过竖曲线时存在的扰动因素, 并研究这些扰动因素对悬浮系统跟踪能力的影响。采用状态反馈控制方法, 通过仿真对单点模型通过竖曲线的动态特性进行研究。仿真结果与实际悬浮列车在跟踪竖曲线轨道时的动态特性相吻合。该分析可为设计和改进悬浮控制系统提供参考。

**关键词:** 磁悬浮列车; 轨道跟踪; 竖曲线; 扰动

**中图分类号:** TP272; N945.12 **文献标识码:** A

## Disturbance Analysis for Maglev Suspension Train Tracking Vertical Curve

Wei Liang<sup>1</sup>, She Longhua<sup>1</sup>, Zhou Fumin<sup>2</sup>, Zhou Jianhang<sup>3</sup>

(1. Magnetic Suspension Research Center, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. No. 61902 Unit of PLA, Yibin 644000, China;

3. Baicheng Weapon Testing Center, Baicheng 137000, China)

**Abstract:** Aiming at the vertical curve tracking problem of maglev suspension train, the single-point levitation model for tracking guide way is built. The disturbance existing in the train and the influence to the tracking capability is analyzed when the train is moving on the vertical curve. The dynamic character of single maglev model moving on the vertical curve is simulated by adopting state feedback method. The simulation result is consistent with the dynamic character of the real maglev train when tracking the vertical curve. It can provide reference for designation and improvement the maglev control system.

**Keywords:** maglev suspension train; guide track; vertical curve; disturbance

### 0 引言

为使列车在通过竖曲线时能安全稳定地运行, 必须保证悬浮系统具有良好的轨道跟踪能力。影响轨道跟踪性能的扰动来源主要包括: 竖曲线等轨道不平顺因素、加速度计正反馈干扰、空气弹簧作用力的变化等。这些扰动因素与轨道竖曲线的几何特征、列车的运行速度之间存在一定的约束关系<sup>[1]</sup>。在轨道竖曲线参数不变的情况下, 列车运行速度越快, 悬浮系统受到的扰动就越大。当速度超过一定阈值时, 将会导致悬浮系统出现振荡甚至发散现象。故结合 CMS-03 型磁浮列车的模型参数, 建立单点悬浮系统通过竖曲线时的动力学模型, 并分析运动过程中的扰动因素, 对施加干扰后的动态特性进行仿真分析。

### 1 单点悬浮系统建模

磁悬浮列车是一个由车厢、空气弹簧、转向架、电磁铁和轨道组成的非线性系统, 模型过于复杂,

需要对模型进行简化。以 CMS-03 型磁浮列车为研究对象, 将每节车厢划分为 16 个独立工作的单点悬浮模型, 主要研究单点悬浮模型。单点悬浮控制模型如图 1。

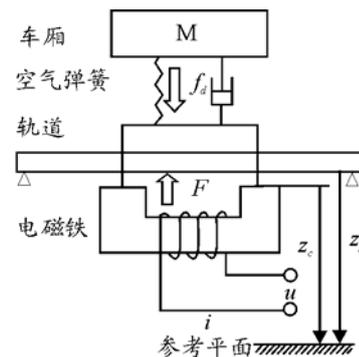


图 1 单点磁悬浮控制模型

假定: 1) 忽略绕组漏磁通; 2) 忽略磁铁芯和导轨中的磁阻, 即认为气隙  $z(t)$  中的磁势均匀分布; 3)  $z(t)$  取向下为运动的正方向。设  $N$  为电磁铁绕组匝数,  $A$  为电磁铁面积,  $i(t)$  为线圈电流,  $u(t)$  为线

收稿日期: 2010-04-06; 修回日期: 2010-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目静浮条件下磁浮列车的车轨弹性耦合振动研究控制 (60974128)

作者简介: 魏亮 (1982-), 男, 吉林人, 国防科学技术大学硕士生, 从事磁悬浮控制研究。

圈两端电压， $m$  为电磁铁和转向架的质量， $M$  为空气弹簧上部质量， $z_c(t)$  为电磁铁的绝对位移， $z_g(t)$  为轨道平面的绝对位移， $f_d(t)$  表示车体通过空气弹簧对转向架的作用力。经推导，可得到系统的动力学方程如下<sup>[2-3]</sup>：

$$\begin{cases} m\ddot{z}_c(t) = -F(i, z) + mg + f_d(t) \\ u(t) = Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2} \frac{i(t)}{z(t)} - \frac{\mu_0 N^2 A}{2} \frac{i(t)\dot{z}(t)}{[z(t)]^2} \\ F(i, z) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[ \frac{i(t)}{z(t)} \right]^2 \\ z(t) = z_c(t) - z_g(t) \\ F(i_0, z_0) = mg + Mg \\ f_{d0}(t) = Mg \end{cases} \quad (1)$$

针对式 (1) 建立的动力学模型为非线性模型，

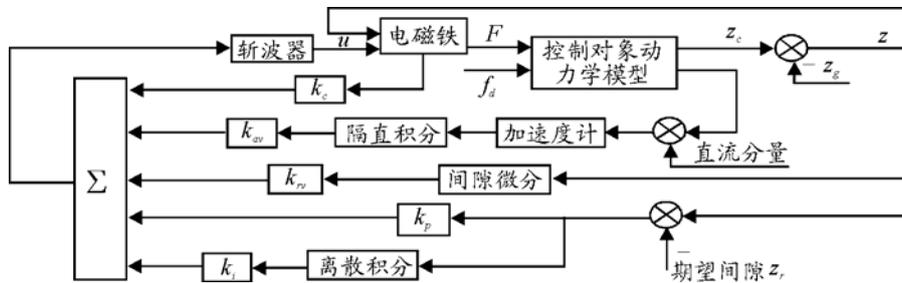


图 2 A 控制方案结构框图

在 A 控制方案中，间隙  $z$  和电流  $i$  可以由传感器直接获得；速度信号包含由间隙信号微分获得的相对速度信号和由加速度信号积分获得的绝对速度信号；对间隙偏差采用积分反馈以消除静态偏差，使系统工作在所期望的平衡点。

磁悬浮列车在进、出竖曲线过程中，系统将会受到扰动冲击，影响悬浮性能。从控制系统结构及其控制对象动力学分析，影响悬浮性能的因素主要来自轨道位移  $z_g(t)$  变化、加速度计的正反馈干扰和空气弹簧作用力  $f_d(t)$  变化 3 个方面。

### 2.1 轨道平面 $z_g(t)$

为保证列车运行的安全和平稳，线路纵断面变坡度点处需设置竖曲线。竖曲线形式一般采用圆弧曲线，其主要参数是圆弧半径和弧度差。竖曲线结构示意图如图 3。

列车在竖曲线段运行时，其所在位置与角度  $\alpha$  满足如下关系：

$$\alpha = \frac{V}{R} \cdot t \quad (3)$$

悬浮系统的输入就是轨道平面的高度，在竖曲线内，轨道平面的高度为：

用于对列车在竖曲线运行时的仿真。

### 2 竖曲线情况下的扰动分析

在磁悬浮控制中，采用常用的状态反馈，闭环控制状态反馈组合为：间隙反馈、间隙微分反馈、加速度隔直积分反馈和电流反馈，并对间隙偏差采用积分反馈以消除静态偏差，使系统稳定在所期望的平衡点。控制律为：

$$u = k_p \cdot (z - z_r) + k_{rv} \cdot \dot{z} + k_{av} \int \ddot{z} dt + k_i \cdot \int (z - z_r) dt + k_c i \quad (2)$$

式中， $u$  为控制电压， $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_{rv}$ 、 $k_{av}$ 、 $k_c$  为反馈参数，上述控制方案简称为 A 控制方案。磁悬浮列车控制结构如图 2。

$$z_g(t) = R(1 - \cos \alpha) = \frac{V^2}{2R} \cdot t^2 \quad (4)$$

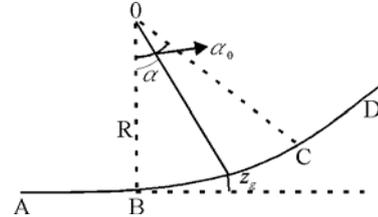


图 3 轨道竖曲线结构示意图

### 2.2 加速度计的正反馈因素

加速度计水平安装在电磁铁上，测量电磁铁垂直运动的加速度。

在水平段 AB，加速度计的测量值为：

$$a(t) = g - \ddot{z}(t) \quad (5)$$

在竖曲线段 BC，加速度计的测量值为：

$$a(t) = g \cdot \cos \alpha + \frac{V^2}{R} - \ddot{z}(t) \quad (6)$$

在斜坡段 CD，加速度计的测量值为：

$$a(t) = g \cdot \cos \alpha_0 - \ddot{z}(t) \quad (7)$$

在进、出竖曲线过程中，悬浮控制系统要分别承受幅值为  $\pm \frac{V^2}{R}$  的阶跃信号冲击，阶跃信号与  $\ddot{z}(t)$  符号相反，加速度通道出现正反馈因素。加速度反

馈通道的控制量减小, 电磁力减小, 这与上坡时电磁力增大的要求相反, 引起悬浮间隙变化。

### 2.3 空气弹簧作用力 $f_d(t)$

空气弹簧组成二次系, 连接车厢和转向架。在稳定悬浮的情况下, 空气弹簧压力  $f_{d0}(t) = Mg$ 。当磁悬浮列车在进入竖曲线的过程中, 列车前端转向架随着轨道平面向上运动, 引起位于车头的 2 个空气弹簧受到快速压缩, 发生向下位移。由于延时作

用, 气阀在空气弹簧压缩的过程中来不及向空气弹簧内部充气, 这个过程可以等效为绝热过程。列车运行得越快, 向下位移量越大, 空气弹簧的压力变化越大, 这也是引起“点头效应”的重要原因之一。

### 3 仿真

仿真结果模型参数采用 CMS-3 型磁悬浮列车的实际数据和唐山试验线的实际数值。图 4 为采用控制方案 A 的情况下, 列车通过竖曲线时的悬浮间隙、电磁铁电流、电磁力变化曲线。

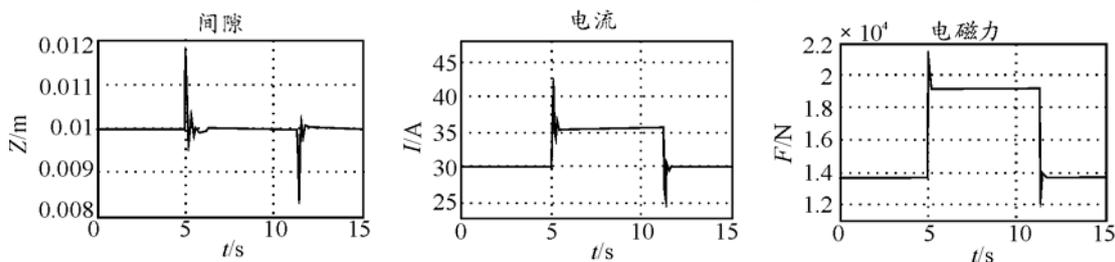


图 4 方案 A 竖曲线段运行情况 (速度 60 km/h, 半径 1 500 m, 坡度 70‰)

在对系统进行仿真时, 可通过屏蔽其他扰动因素, 单独计算每项扰动因素对于控制间隙的影响。在半径 1 500 m, 坡度 70‰的条件下, 单独考虑每项扰动因素引起的间隙最大变化和同时考虑所有因素引起的最大变化, 见表 1。在同一竖曲线半径下, 悬浮间隙的最大变化随列车运行速度的增加而增大; 同时考虑所有扰动因素的间隙变化, 等于单独考虑每个扰动因素引起的间隙变化之和, 说明上述扰动因素之间无相互影响; 空气弹簧作用力变化引起的间隙变化远大于轨道因素和加速度计因素,

说明引起间隙扰动的因素主要来自于车体设计结构; 轨道平面  $z_g(t)$  和加速度计  $a(t)$  引起的间隙变化相同, 这是因为当电磁铁跟踪轨道竖曲线做匀速圆周运动时, 轨道输入的变化使电磁铁产生离心加速度。电磁铁的离心加速度和加速度计的正反馈干扰在数值相等, 都等于  $v^2/R$ 。但是电磁铁的离心加速度存在于动力学模型中; 加速度计的正反馈干扰来自传感器信号, 并含有噪声, 两者的物理意义并不相同。

表 1 扰动因素引起的间隙最大变化

mm

扰动因素	$v/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$				
	20	40	60	80	100
轨道平面 $z_g(t)$	0.02	0.11	0.22	0.41	0.63
加速度计 $z_g(t)$	0.02	0.11	0.21	0.40	0.63
空气弹簧作用力 $f_d(t)$	0.12	0.63	1.54	2.71	6.16
干扰因素全部考虑	0.18	0.85	1.93	3.51	7.06

### 4 结束语

仿真结果表明: 在不同的速度条件下, 磁悬浮系统的轨道跟踪能力不同; 列车运行速度越快, 扰动值越大, 对悬浮系统的轨道跟踪能力影响也就越大。仿真结果与实际磁悬浮列车跟踪轨道动态特性相吻合, 可为下一步完善算法、消除扰动提供参考。

### 参考文献:

[1] 李云钢, 常温森, 张鼎. EMS 型磁浮列车悬浮控制系统

对爬坡能力的约束分析[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(4): 106-109.  
 [2] 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.  
 [3] 陈慧星, 龙志强, 常文森. 磁悬浮列车在坡道运行时动态特性分析[J]. 控制工程, 2006(13).  
 [4] 余龙华, 卢晓慧, 施晓红. 基于变量梯度法的磁悬浮控制系统的状态稳定性[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(4): 657-660.  
 [5] 龙志强, 李淑娟, 郝阿明, 等. 电磁悬浮型列车在坡道段运行时的系统分析[J]. 机车电传动, 2003(4): 25-28.