

文章编号: 1001-2486(2003)02-0084-06

考虑轨道周期性不平顺的磁浮列车悬浮控制系统设计*

龙志强, 郝阿明, 常文森

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要:以八达岭旅游线用中低速磁浮列车为研究对象,在建立悬浮控制系统模型的基础上,通过分析磁浮列车悬浮控制系统与轨道的相互作用规律,探讨了轨道周期性不平顺条件下悬浮控制系统的设计问题,比较了相对位移(间隙)、绝对速度和绝对加速度反馈与相对位移(间隙)、相对速度和相对加速度反馈两种控制方案的特点,给出了不同车速不同梁跨条件下的悬浮间隙变化的仿真结果,为今后的悬浮控制系统设计、线路设计和施工提供参考。

关键词:磁浮列车; 悬浮控制; 轨道不平顺; 仿真

中图分类号:TP13 **文献标识码:**A

Suspension Controller Design of Maglev Train Considering the Rail Track Periodical Irregularity

LONG Zhì-qiang, HAO A-ming, CHANG Wen-sen

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The low speed maglev train which will be used in Badaling traveling line is regarded as the research object. On the basis of building the model of maglev control system and by analyzing the reciprocity between the maglev train and the rail, the designation of maglev train controller under the periodical irregularity of the rail is discussed. Two control schemes are also compared in this paper, one of which uses the relative displacement, the absolute velocity and the absolute acceleration as the feedback, the other uses the relative displacement, the relative velocity and the relative acceleration. The simulation results under different velocity and different bridge span are given in order to provide reference to the designation of the maglev control system and to the designation and construction of the rail track.

Key words: maglev train; maglev control; irregularity of the rail track; simulation

磁浮列车从悬浮机理上可分为电动悬浮(EDS)和电磁悬浮型(EMS)。电动式悬浮系统在实际应用速度下,悬浮间隙较大,属自稳定控制系统,无需主动式的悬浮与导向控制。而电磁悬浮通过对车载的电磁铁与轨道上的铁磁性构件(钢质导轨或长定子直线电机定子铁芯)相互吸引,将列车向上拉起悬浮于轨道上,由于电磁力有限,电磁铁和铁磁轨道之间的悬浮间隙一般约8~10mm,列车通过直线电机来牵引行走,通过控制悬浮电磁铁的励磁电流来保证稳定的悬浮间隙。因此,电磁悬浮型的磁悬浮在运行中对轨道平顺性的要求高于电动悬浮型的磁悬浮列车。

1 悬浮控制系统的动力学模型

所研究的CMS-3型磁浮列车采用模块化的转向架形式,使得由多个电磁铁共同悬浮的磁悬浮列车的每一对电磁铁都有独立的控制自由度。因此,磁浮列车的悬浮控制问题可以简化为单个电磁铁的悬浮控制问题。

在实际的磁浮列车中,车厢与悬浮电磁铁(转向架)之间通过空气弹簧连接,以CMS-3型磁浮列车为研究对象,全车共有4个转向架,对应8个悬浮模块和16对电磁铁作为一系悬挂;在每一个转向架上

* 收稿日期:2002-10-18

基金项目:国家十五863高速磁浮交通技术重大专项支持项目

作者简介:龙志强(1967—),男,副教授,硕士。

装有4个空气弹簧作为二系悬挂,则全车对应16个空气弹簧,车厢每侧各对应8个。当磁浮列车通过线路的凸竖曲线和凹竖曲线时,由于悬浮控制力的约束,转向架将沿轨道按折线分布,此时空气弹簧的高度将变化。根据计算,在1000m竖曲线半径的条件下空气弹簧的高度最大变化量将小于10mm,在弹簧不充放气且空气弹簧高度在额定工作点(高度为267mm)的条件下,根据空气弹簧的力一位移特性曲线,其空气压力和对转向架的作用力基本保持不变,因此可以将车体对转向架的作用力 $f_d(t)$ 作为常数考虑。此外,根据空气弹簧技术参数和实验测试,在空气弹簧气压为 2.4kg/cm^2 (车辆空载条件下),对应刚度为 80kg/cm ,而悬浮控制系统的刚度为 2000kg/cm ,从此角度考虑也可忽略空气弹簧的动态影响^[2]。

基于以上考虑,在分析和设计悬浮控制系统时,主要考虑磁浮列车电磁铁的振动和悬浮间隙的变化,将轨道和梁对电磁铁的作用,作为轨道不平顺输入。以下的讨论只涉及悬浮电磁铁和轨道的运动状态,如图1所示。

$$z(t) = c(t) + h(t) \quad (1)$$

其中, $c(t)$ 为磁极与轨道间的悬浮间隙, $h(t)$ 和 $z(t)$ 分别为轨道表面和磁极表面相对于绝对参考平面的实时距离。

对于考虑轨道不平顺的动态模型,不难理解此时电磁铁的加速度应为绝对加速度 $\ddot{z}(t)$;而电磁吸力和线圈电感仍仅与相对于轨道表面的间隙 $c(t)$ 有关; $h(t)$ 表示轨道不平顺,定义为干扰信号。

在推导电磁学模型时假定:(1)忽略绕组漏磁通。(2)忽略磁铁芯和轨道中的磁阻,即认为磁势均匀降在间隙 $c(t)$ 上。(3)定义 $z(t)$ 向下为运动的正方向。

设 N 为电磁铁绕组匝数, A 为磁极面积, $i(t)$ 为线圈电流, $v(t)$ 为线圈两端电压, R 表示线圈两端电阻, m 表示转向架和电磁铁的质量, $f_d(t)$ 表示车箱体通过二次系对转向架的作用力。可以得到考虑轨道不平顺条件下的单电磁铁动态模型方程^[3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{力学方程} \quad m\ddot{z}(t) = -F(i, c) + mg + f_d(t) \\ \text{电学方程} \quad v(t) = Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2} \frac{\dot{i}(t)}{c(t)} - \frac{\mu_0 N^2 A}{2} \frac{i(t)\dot{c}(t)}{[c(t)]^2} \\ \text{电-力学关联方程} \quad F(i, c) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[\frac{i(t)}{c(t)} \right]^2 \\ \text{参考坐标方程} \quad z(t) = c(t) + h(t) \\ \text{边界条件 1} \quad F_0(i_0, c_0) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[\frac{i_0}{c_0} \right]^2 = mg + f_d(t) \\ \text{边界条件 2} \quad z_0 = c_0 + h_0 \end{array} \right. \quad (2)$$

这是一组非线性方程,主要应用在系统仿真。若要用线性理论进行控制器设计,需在平衡点 (i_0, c_0, z_0) 进行线性化处理。可以得到系统的线性化模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} m \Delta \dot{z}(t) = k_z \Delta c(t) - k_i \Delta i(t) + \Delta f_d(t) \\ \Delta v(t) = R \Delta i(t) + L_0 \Delta \dot{i}(t) - k_i \Delta c(t) \\ \Delta z(t) = \Delta c(t) + \Delta h(t) \end{array} \right. \quad (3)$$

其中 $k_z = \frac{\mu_0 N^2 A i_0^2}{2c_0^3}$, $k_i = \frac{\mu_0 N^2 A i_0}{2c_0^2}$, $L_0 = \frac{\mu_0 N^2 A}{2c_0}$ (且有 $L_0 k_z = k_i^2$)。

上面系统状态变量可以有多种选择,如: $(\Delta c, \Delta \dot{c}, \Delta i)^T$, $(\Delta c, \Delta \dot{c}, \Delta \dot{z})^T$, $(\Delta \dot{c}, \Delta \dot{z}, \Delta i)^T$, $(\Delta c, \Delta \dot{c}, \Delta \dot{z})^T$, $(\Delta c, \Delta z, \Delta \dot{z})^T$ 等。如果选择状态变量为 $(\Delta c, \Delta \dot{c}, \Delta \dot{z})^T$, 则由式(3)可得如下的状态方程:

$$\dot{X} = AX + Bu + PW$$

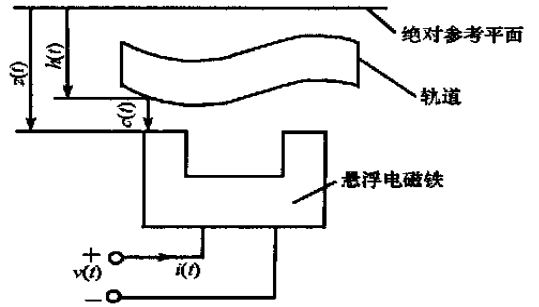


图1 考虑轨道不平顺的单电磁铁示意图

Fig. 1 Single magnet suspension system considering the irregularity of the track

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{c} \\ \Delta \ddot{c} \\ \Delta \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_z R}{mL_0} & 0 & -\frac{R}{L_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta c \\ \Delta \dot{c} \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{k_i}{mL_0} \end{bmatrix} [\Delta v(t)] + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ \frac{R}{mL_0} & \frac{1}{m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_d(t) \\ \Delta f_a(t) \\ \Delta \dot{h}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

从(4)式可以推出,系统是能控能观的。此外,还可以判断这是一个三阶不稳定系统,因此为使系统稳定必须采用反馈控制,开环系统对应模型方框图如图 2 所示。

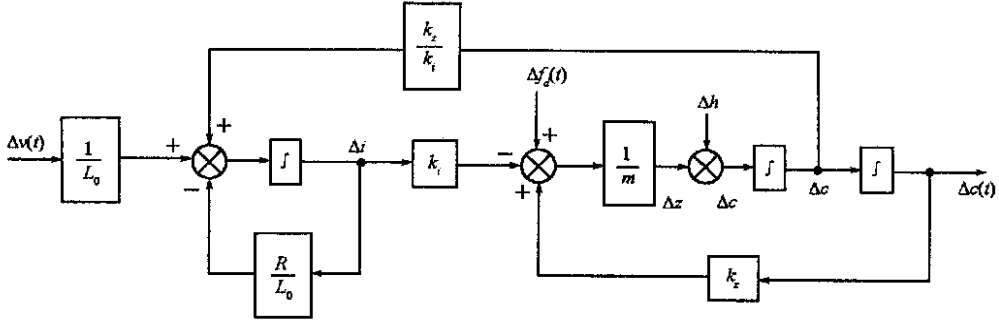


图 2 单磁铁悬浮系统模型方框图

Fig. 2 The model of single magnet suspension system

2 轨道周期性不平顺数学描述

轨道不平顺性主要包括:

由于梁的收缩和徐变以及车辆等负载加上后引起的静挠度而造成的轨道梁不平顺,所以,其变化波长为梁的跨度,频率与车速有关,其不平顺近似于正弦曲线,即 $h(t) = a \cdot \sin \omega t$, $\omega = 2\pi V/L$, V 为车速, L 为梁长。 a 为梁在垂向的最大挠度,如图 3 所示。



图 3 轨道的周期性的不平顺

Fig. 3 The periodical irregularity of rail track

轨道的安装误差,这是随机性的误差。

本文主要考虑第一种轨道的不平顺性,通过分析给出轨道的最大安装误差范围。

在国防科技大学的 204m 试验线上有 18m、20m、24m 三种类型的梁,根据测试,所有单跨简支轨道梁在车辆负载作用下,跨中挠度均小于 $L/3000$, L 为简支梁的跨径,考虑最不利条件,取梁的挠跨比为 $1/3000$,对应 12m、18m、20m、24m 梁的跨中挠度 a 为: 0.004m、0.006m、0.0067m、0.008m。

不同车速下,轨道不平顺的变化频率如表 1。

表 1 不同车速条件下的轨道不平顺的变化频率(单位: Hz)

Tab. 1 The frequency of the rail track irregularity under different velocity (Unit: Hz)

$V(\text{km/h})$ $L(\text{m})$	30	60	100	150	200	250	300	350	400	500
12	0.69	1.39	2.31	3.47	4.62	5.79	6.94	8.10	9.26	11.6
18	0.46	0.92	1.54	2.31	3.08	3.86	4.62	5.40	6.16	7.72
20	0.42	0.84	1.39	2.08	2.78	3.47	4.16	4.86	5.56	6.94
24	0.35	0.69	1.16	1.74	2.31	2.90	3.47	4.05	4.63	5.80

3 悬浮控制系统设计

3.1 控制器设计

由于电磁铁悬浮系统的固有不稳定性,必须采用闭环控制才能使系统稳定。控制器可采用经典控制中的超前一滞后校正网络,也可以单电磁铁悬浮系统的线性化模型为基础,应用线性控制理论进行综合和设计,甚至可基于单电磁铁悬浮系统的非线性模型,应用非线性控制理论进行综合和设计。因而控制方案多种多样。考虑便于系统调试,本文给出一种工程化的方法——分级简化分析设计法。

由图 2 可知,系统本身已带有一个不稳定正反馈(K_z),而电压方程对应的惯性环节 $\frac{1/R}{1+(L_0/R)s}$ 又增加了系统不稳定,因此首先对电流内环进行校正,加快电流环的响应速度,增加其带宽,使得在分析位置环时可将电流环等效成比例环节,从而使整个控制系统简化成一个二阶系统。外环的一种典型的控制方案是采用相对位移(间隙)、绝对速度和绝对加速度反馈,即反馈控制规律为:

$$\Delta v(t) = -K[\Delta u - (K_p \Delta c + K_v \Delta \dot{z} + K_a \Delta \ddot{z})] \quad (5)$$

其中, Δu 为电磁铁驱动电路控制信号的给定值; K 为驱动电路的放大倍数; K_p 、 K_v 、 K_a 分别为间隙、绝对速度、绝对加速度的反馈增益。构成的闭环控制系统的结构图如图 4 所示。

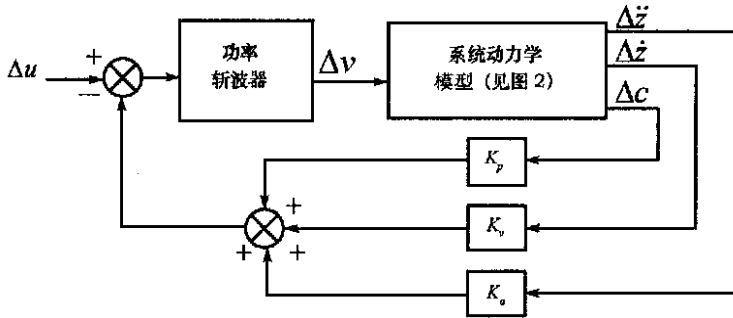


图 4 单磁铁悬浮系统反馈控制结构图

Fig. 4 Diagram of single magnet suspension control system

外环的第二种控制方案是采用相对位移(间隙)、相对速度和相对加速度反馈,反馈控制规律如式(6),对应图略。

$$\Delta v(t) = -K[\Delta u - (K_p \Delta c + K_v \Delta \dot{c} + K_a \Delta \ddot{c})] \quad (6)$$

K_p 、 K_v 、 K_a 的参数确定参考文献[3],本文重点比较两种控制方案对轨道周期性的不平顺干扰的适用性等问题。

实际系统中间隙信号由间隙传感器给出,绝对加速度由加速度传感器给出,绝对速度由绝对加速度积分得到,相对速度则由间隙信号微分得到。

3.2 系统仿真分析

在 CMS-3 型磁浮列车中,电磁铁绕组匝数 $N = 324$ 匝,磁极面积 $A = 0.021\text{m}^2$,转向架在每个电磁铁上的等效质量 $m = 750\text{kg}$,电磁铁线圈等效电阻 $R = 0.5\ \Omega$,静态悬浮电流 $i_0 = 26\text{A}$,静态悬浮间隙为 8mm 。控制器参数 $K_p = 3352$, $K_v = 45$, $K_a = 0$,电流互感器增益为 0.12 ,电流反馈增益 $K_i = 20$,功率斩波器增益为 -16 。

以磁浮列车的非线性模型方程(2)为研究对象,使用 matlab 对系统进行了仿真分析,可以得到采用两种不同控制方案的磁悬浮列车在不同车速条件下的悬浮间隙误差的变化曲线。

图 5 为车速为 150km/h ,梁长为 24m 情况下的间隙变化曲线,左侧曲线采用第一种控制方案,右侧曲线采用第二种控制方案。表 2 和表 3 给出了不同车速、不同梁长条件下的两种控制方案的悬浮间隙误差幅值 $\Delta c_m(c(t) - c_0)$ 。

在图 5 中, Δh 、 Δz 分别为轨道表面和磁极表面相对于绝对参考平面的距离的变化量, Δc 为磁极与

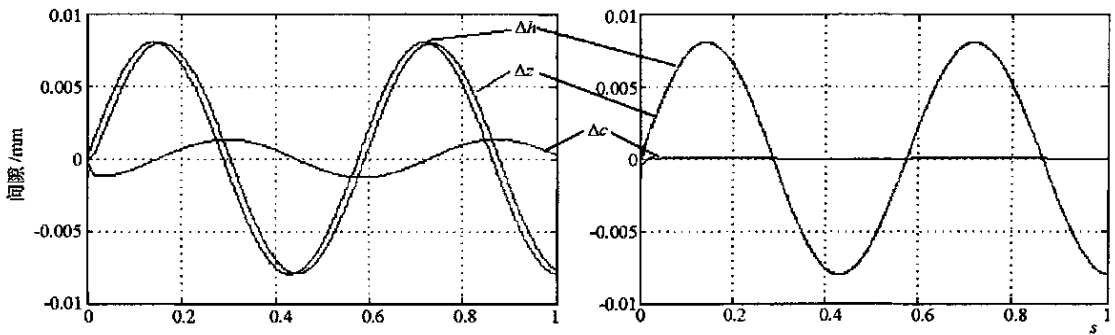


图5 车速为150km/h,梁长为24m情况下的三间隙变化曲线

Fig. 5 Gap change under velocity of 150km/h and girder length of 24m

轨道间的悬浮间隙的变化量,由图5、表2和表3可以看出在相同的车速和梁长条件下,采用第二种控制方法的磁悬浮列车的悬浮间隙误差变化很小,列车基本上能够跟踪轨道的周期性不平顺,即使在轨道梁长度12m时达到500km/h速度,间隙误差的幅值也仅0.98mm,而此时采用第一种控制方法的列车悬浮间隙误差幅值达到了3.5mm。

表2 不同车速、不同梁长条件下的第一种控制方案的悬浮间隙误差幅值(单位:mm)

Tab. 2 The max gap error of the first control scheme under different velocity and different girder length (Unit: mm)

$V(\text{km/h})$ $L(\text{m})$	30	60	100	150	200	250	300	350	400	500
12	0.26	0.53	0.87	1.25	1.67	2.05	2.35	2.68	2.96	3.50
18	0.26	0.52	0.88	1.30	1.73	2.04	2.52	2.90	3.25	3.92
20	0.27	0.54	0.88	1.32	1.75	2.16	2.56	2.95	3.32	4.01
24	0.27	0.53	0.83	1.32	1.74	2.17	2.58	2.98	3.37	4.11

表3 不同车速、不同梁长条件下的第二种控制方案的悬浮间隙误差幅值(单位:mm)

Tab. 3 The max gap error of the second control scheme under different velocity and different girder length (Unit: mm)

$V(\text{km/h})$ $L(\text{m})$	30	60	100	150	200	250	300	350	400	500
12	0	0.02	0.05	0.1	0.18	0.27	0.38	0.51	0.65	0.98
18	0	0.01	0.03	0.07	0.12	0.17	0.27	0.36	0.46	0.71
20	0	0.01	0.03	0.06	0.11	0.17	0.24	0.33	0.42	0.65
24	0	0.01	0.023	0.052	0.09	0.14	0.20	0.28	0.36	0.55

4 结束语

(1) 根据结构动力学的要求,为减少轨道在列车运行时的动力学响应,即列车经过轨道梁时梁体的振动(轨道梁通常以自振频率做自由振动),并且该振动将叠加在轨道梁的不平顺上。经过实际测量,试验线轨道梁一次振型结构频率分别为:18m梁对应9.0Hz;20m对应7.7Hz;24m对应6.0Hz。由表1可以看出,中低速运行条件下(200km/h以下)时,各种轨道梁一次振型结构频率远大于1.1倍运行时轨道不平顺的频率,因此对于中低速磁浮列车两种频率是错开的。而对于时速300km以上的磁浮列车,两种频率较接近,因此有必要考虑进一步降低梁挠跨比,提高梁的一次振型结构频率,并在悬浮控制系统设计中不仅要考虑梁的不平顺,而且要考虑轨道梁的振动^[4,5]。

(2) 对于中低速运行条件下的磁悬浮列车,不论采用控制方案1或2,磁浮车的悬浮控制系统对轨

道的长波(其波长与车速有关)不平顺跟随性较好。如考虑 18m 长的梁,若挠跨比取 1/3000,最大挠度为 0.006m,车速在 200km/h 条件下,悬浮间隙最大变化量为 1.73mm,考虑 2mm 的安全距离,悬浮控制系统调节时波动 1mm,目标悬浮间隙取 8mm,轨道梁的安装误差可设定在最大,为 3.27mm。由此可见,试验线的轨道梁设计标准定得较高,经长期试验后可考虑降低梁设计标准,以降低线路造价。

(3)对于高速运行的磁悬浮列车(车速在 300km/h 以上),对应较高频率的轨道状态变化(即较短波长的轨道不平顺),由表 3 可知,采用方案 2 的悬浮系统对轨道状态的跟随性较好。由表 2 可知,采用方案 1 的悬浮系统对轨道状态的跟随性差,只能依靠增加轨道梁刚度(减小挠度)和提高安装精度的办法来保证悬浮电磁铁不与轨道相撞。例如考虑高速运行的磁悬浮列车,对于 24m 长的梁,若挠跨比分别取 1/3000、1/4800、1/5800、1/6800,则在不同车速不同挠跨比条件下的第一种控制方案的悬浮间隙误差幅值如表 4。从表 4 可得,在车速 400km/h 下,挠跨比取 1/4800,悬浮间隙误差幅值为 2.11mm;若在高速条件下调整目标悬浮间隙至 10mm,轨道安装误差为 1mm,悬浮控制系统调节时波动为 1mm,则安全距离考虑有近 6mm(包括轨道振动所引起的间隙变化)。

表 4 24m 梁在不同车速不同挠跨比下的第一种控制方案的悬浮间隙误差幅值(单位: mm)

Tab.4 The max gap error of the first control scheme under different velocity and the girder length of 24m(Unit: mm)

挠跨比 \ V/(km/h)	300	350	400	500
1/3000	2.58	2.98	3.37	4.11
1/4800	1.61	1.86	2.11	2.57
1/5800	1.32	1.53	1.73	2.11
1/6800	1.13	1.3	1.47	1.80

(4)总的来说,采用控制方案 2 的磁悬浮列车对轨道的跟随性比采用控制方案 1 的磁悬浮列车要好得多,但控制方案 2 由于微分作用,更易引入干扰,必须对信号采用滤波处理,对于中低速磁悬浮列车,控制方案 1 是比较好的选择,对于高速磁悬浮列车如采用控制方案 1,则只能依靠增加轨道梁刚度和提高安装精度来解决。

参考文献:

- [1] 范钦海. 高速常导磁悬浮车辆对轨道不平顺要求的探讨[J]. 中国铁道科学, 2002(1).
- [2] 尹力明, 赵志苏. 空气弹簧在磁悬浮列车上的应用研究[J]. 机车电传动, 2002(5).
- [3] 龙志强, 余龙华, 尹力明, 等. 磁悬浮隔振系统设计与实现[J]. 国防科技大学学报, 1996(3).
- [4] 赵春发, 翟婉明, 蔡成标. 磁浮车辆/高架桥垂向耦合动力学研究[J]. 铁道学报, 2001(5).
- [5] 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(4).