

## 磁浮轨道不平顺对悬浮系统影响的抑制方法\*

余佩倡, 李杰, 周丹峰, 李金辉, 王连春  
(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**为了研究磁浮轨道不平顺对悬浮系统的影响,介绍了轨枕铺设、轨道梁距离这两个轨道周期性不平顺的主要来源,建立带轨道周期性不平顺的悬浮模块模型。在此基础上,从干扰输入和系统输出的角度探究轨道不平顺对悬浮系统的影响。以数值仿真的方式,分析系统在额定车速下,受到不同轨道波长激励时的悬浮间隙波动输出。结合唐山轨道不平顺功率谱,指出车辆运行时的敏感波长区域,从轨枕铺设和轨道梁架设距离两个方面提出改进意见。针对现有的磁浮轨道工况,从控制器设计角度研究调整控制参数对抑制轨道周期性不平顺干扰的影响。

**关键词:**磁浮列车;悬浮系统;轨道不平顺

**中图分类号:**TP13 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)04-191-08

## Method for suppressing influence of track irregularity to maglev suspension system

YU Peichang, LI Jie, ZHOU Danfeng, LI Jinhui, WANG Lianchun

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

**Abstract:** In order to analyze the track irregularity, the source of the periodical irregularity was introduced, and the simplified model of track irregularity and a levitation module model were built. Based on these models, the impact of track irregularity on the suspension was discussed. The gap fluctuation of the system was analyzed when stimulated by the different length wavelength of the track periodical irregularity. Considering the track power spectrum density in the Tangshan maglev experimental line, the sensitive wave length was pointed and some advice for the improvement of the track building was given. As the fact that many low-speed maglev tracks have been built, the way of adjusting parameters of the controller to reduce the disturbance from track periodical irregularity was studied.

**Key words:** maglev train; suspension system; track irregularity

磁浮轨道不平顺作为磁浮列车悬浮系统的主要激励源,对悬浮系统影响甚大。当轨道存在不平顺时,车体的振动幅值将增大,直接对悬浮的稳定性、运行的安全性和舒适性造成影响。因此,减小轨道不平顺给悬浮系统带来的不利影响,这是悬浮控制研究的重点问题之一。针对这一问题,诸多学者对此进行了探索<sup>[1-4]</sup>。

时瑾等对磁浮列车在随机不平顺干扰下的动态特性进行了研究,指出轨道垂向的长波周期性不平顺是造成车辆振动的首要原因之一<sup>[2]</sup>。为了探究轨道不平顺的特性,张耿等通过实测的方式对磁浮轨道不平顺功率谱进行了研究,研究结果表明轨道周期性不平顺是轨道激励的主要组成部分,并指出了轨枕铺设和轨道梁相隔距离是造成这种周期性不平顺波产生的原因<sup>[3]</sup>。为了分

析轨道周期性不平顺对悬浮控制的影响,龙志强等<sup>[4]</sup>研究了抑制轨道周期性不平顺的控制器设计策略,从悬浮性能要求的角度对悬浮控制器的设计方法和轨道结构提出了要求。但该研究还是基于单电磁铁模型,具有一定的局限性。Zhao等<sup>[5]</sup>为了对高速磁浮列车进行研究,建立了整车模型,分析了系统在轨道不平顺激励下的响应,同时也对乘坐舒适性进行了研究。Zhao指出,在高速下,车体的振动频率在0.5~1 Hz区间,系统应当避免车速与轨道梁弹性形变耦合从而产生2.2 Hz的激励输入。文献[6]针对低速磁浮列车的问题,从弹性轨道梁的挠度、长度以及车辆运行车速等出发,研究了它们对系统悬浮间隙的影响,为减小轨道梁形变对悬浮间隙的影响给出了有益的结论。Kong等<sup>[7]</sup>分析了线性二次型调节控制

\* 收稿日期:2015-05-21

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2012BAG07B01)

作者简介:余佩倡(1987—),男,湖南湘潭人,博士研究生,E-mail:lofter@163.com;

李杰(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:jieli@nudt.edu.cn

和滑模控制两种鲁棒控制器下悬浮间隙和车厢加速度的波动情况以及不同控制器对系统稳定性和舒适性的影响,为系统采用先进的控制策略提供了参考。Yau<sup>[8]</sup>从共振频率的角度出发,对轨道和车速的关系进行了研究,指出当车速和不平顺波长激起的频率接近车轨共振频率时,将影响到车辆的稳定性运行,并设计了神经网络比例积分控制器来抑制间隙和加速度波动,取得了良好的效果。在磁浮列车中还存在与轨道梁结构相关的另外一类自激振动问题,这种激励是通过车辆和轨道相互耦合,将轨道自身模态激励出来,从而带来周期性激励。对于该类问题,Wang 等<sup>[9]</sup>则从结构参数调整的角度出发,研究了抑制车轨耦合振动的方法。Li<sup>[10-12]</sup>、Zhou<sup>[13-14]</sup>等从桥梁结构和悬浮系统设计方面对这类问题进行了深入研究。

以上研究都为磁浮轨道周期性不平顺的研究奠定了基础,但是也存在一些不足。首先,实际中是以悬浮模块作为悬浮系统的最小单元,而之前研究大都以单悬浮电磁铁为研究对象进行的,不能充分反映轨道干扰对悬浮模块整体的影响。其次,他们的研究主要集中在对轨道梁带来的长波周期性不平顺方面,但是对于低速磁浮来说,轨枕的短波周期性不平顺带来的激励频率范围涵盖了系统的响应范围,值得深入进行研究。再次,在悬浮模块建模过程中,普遍忽略了轨道不平顺带来的电气间隙的变化影响,不能全面反映悬浮系统的特性。最后,系统的扰动输出受到轨道干扰输入、悬浮控制系统设计以及悬浮模块自身结构三者之间共同作用,因此,单从控制器设计的角度出发对干扰的抑制能力存在一定的局限性,有必要充分考虑各方面影响,选择合适的其他方法来抑制轨道不平顺的影响。

## 1 磁浮系统模型

为了得到准确的动态响应,首先有必要建立一个悬浮模块的模型。CMS04 低速磁浮列车的侧视图如图 1 所示。一节列车具有 10 个悬浮模块,这些悬浮模块设计不仅要为车体提供垂向的力来保证列车克服重力实现悬浮,同时还需要提供横向的牵引力和制动力。一个悬浮模块可以分为两个悬浮点,每一个悬浮点的电磁铁均可独立控制。悬浮模块与车厢之间通过空气弹簧连接,空气弹簧对车厢起到隔振效果,提高乘客乘坐的舒适性。

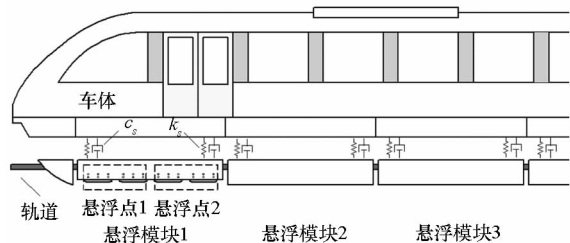


图 1 CMS04 侧视图

Fig. 1 Side view of CMS04

### 1.1 轨道周期性不平顺模型

磁浮轨道周期性不平顺的来源有多种,文献[3]通过对唐山磁浮轨道的不平顺功率谱研究指出,轨道高低周期性不平顺与轨道结构密切相关,主要来源于轨枕的铺设和水泥轨道梁弹性形变带来的周期性不平顺。下面,详细介绍这两种不平顺的来源和造成的原因。文中所有的物理量均只代表大小,同时定义垂直向下方向为正方向。

#### 1.1.1 轨枕铺设带来的周期性不平顺

这是由于磁浮列车特殊的结构造成的。低速磁浮轨道由支承梁、轨枕和钢轨三层结构构成,如图 2 所示。轨枕一般以等距离的方式进行铺设,铺设中存在的安装误差会造成轨道周期性的高低不平顺。这种波长相对较短,近似于轨枕的距离。

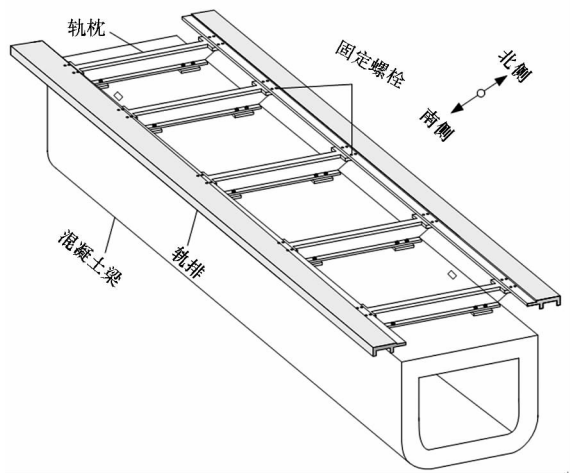


图 2 低速磁浮系统轨道结构图

Fig. 2 Structure of low-speed maglev guide-way

对于高速磁浮来说,这种短波的不平顺以高频激励形式对系统造成影响,远离系统截止频率,一般不会车辆的运行和舒适性造成影响,因此,在高速磁浮中对它的考虑较少。但是对于低速磁浮,这种短波不平顺带来的激励范围容易处于系统响应范围以内,有必要对这种波长进行分析和研究。

#### 1.1.2 水泥轨道梁的距离带来的周期性不平顺

因为轨道梁的跨距较大,而且其本身质量较

大,在重力作用下,轨道将会发生一定的形变,从而造成轨道长波周期性高低不平顺,由此带来的波长长度与轨道梁的距离密切相关。因此当车辆运行速度和波长耦合产生系统固有频率的激励时,车辆垂向加速度剧烈变化。另外一方面,当车辆运行在轨道梁上时,低速时容易造成自激振动<sup>[15]</sup>,大量论文对此进行了分析。

低速磁浮轨道梁的示意图如图3所示,桥梁毫米级的振动幅值相对桥梁的长度来说可以忽略不计,故可以将桥梁视为 Bernoulli-Euler 梁。桥梁的模态阻尼比较小,在推导桥梁的模态频率和振型时,可以暂不考虑模态阻尼的影响。在此前提下桥梁的垂向运动方程为:

$$EI_B \frac{\partial^4 y_B(x,t)}{\partial x^4} + \rho_B \frac{\partial^2 y_B(x,t)}{\partial t^2} = F_E(x,t) \quad (1)$$

其中,  $EI_B$  为桥梁的抗弯刚度,  $\rho_B$  为桥梁的线密度,  $F_E(x,t)$  为作用在桥梁上的电磁力。

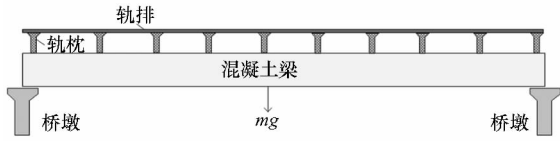


图3 低速磁浮系统轨道梁示意图

Fig. 3 Simplified structure of low-speed maglev bridge

显然,轨道梁是存在多阶模态的,当磁浮系统运行时,受到激励后将产生多种频率的周期性激励,对系统造成影响。对于这一类问题,考虑到其激励的特殊性,属于自激振动范畴,而且其激发一般都是在静止或者车速较慢时,因此只考虑轨道梁弹性形变带来轨道长波不平顺对系统的影响。

值得注意的是,以上两种不平顺之间是不相关的,因此,在分析它们对系统的影响时是线性相加的。不失一般性,针对存在的某一波长为  $\lambda_i$  的周期性不平顺轨道的物理结构可简化为如下形式。

如图4所示,对于相距  $d$  的点1和点2,轨道带来的不平顺与参考面之间距离  $z_p$  可表示为:

$$\begin{cases} z_{p1} = A_i \sin(l/\lambda_i) \\ z_{p2} = A_i \sin[(l+d)/\lambda_i] \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $l$  表示点1与坐标原点的距离,  $d$  为点2与点1的距离,  $A_i$  为该波长不平顺的幅值。

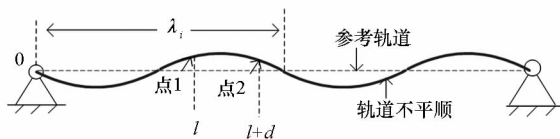


图4 轨道周期性不平顺物理简化模型

Fig. 4 Simplified model of track periodical irregularity

## 1.2 电磁悬浮模块系统模型

为了推导得到悬浮系统的动态模型,在工程允许的条件下需要作以下几个假设<sup>[16]</sup>。首先,忽略车辆的形变的影响。这是因为考虑到来自于转向架的高频的振动基本会被空气弹簧所隔离,因此车辆的自然模态将不会被激励起来。其次,考虑到工作间隙比较小而且在工程误差允许情况下,铁芯和轨道的磁阻将被忽略,也就是说磁场均匀在悬浮气隙中降落。

依据以上假设,考虑磁浮轨道周期性不平顺的状态,轨道周期性不平顺-悬浮模块-车体模型可以被简化成如图5所示。

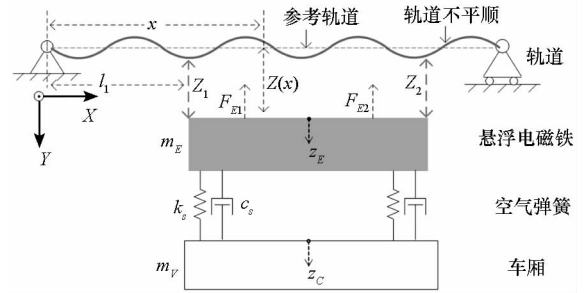


图5 悬浮模块简化后的物理模型

Fig. 5 Simplified model of suspension system

悬浮模块是悬浮控制的基本单元,它包含了两个悬浮点,每个悬浮点是由两个串联的电磁铁组成。如图5所示,轨道存在波长为  $\lambda_i$  的周期性不平顺,  $l_1$  是初始时刻与相对原点的距离,  $Z(x)$  是距离原点  $x$  远的悬浮模块上点与轨道之间的间隙,悬浮模块单个电磁铁长度为  $L_E$ , 车辆以速度  $v$  运动,下面对图5的悬浮模块进行数学建模。

### 1.2.1 电磁力模型

定义悬浮电磁铁的线圈环数为  $N$ , 极面积为  $A$ , 电磁常数为  $\mu_0$ , 通过电流分别为  $i_1(t)$  和  $i_2(t)$ , 那么两个悬浮点产生的悬浮力可表示为:

$$\begin{cases} F_{E1}(t) = 0.5\mu_0 AN^2 [i_1(t)/\bar{\delta}_1(t)]^2 \\ F_{E2}(t) = 0.5\mu_0 AN^2 [i_2(t)/\bar{\delta}_2(t)]^2 \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\bar{\delta}_1(t)$ ,  $\bar{\delta}_2(t)$  两个电磁铁的电气平均间隙为:

$$\begin{cases} \bar{\delta}_1(t) = 0.75z_1(t) + 0.25z_2(t) + z_{1g}(t) \\ \bar{\delta}_2(t) = 0.25z_1(t) + 0.75z_2(t) + z_{2g}(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $z_{1g}(t)$ ,  $z_{2g}(t)$  是由轨道不平顺造成的电磁铁与轨道之间平均间隙的扰动量;  $z_1(t)$ ,  $z_2(t)$  为传感器位置测量的悬浮间隙。

### 1.2.2 电压平衡模型

电磁力的产生是由于电磁铁在电压  $u(t)$  控制下通入了电流  $i(t)$ , 而对于悬浮模块的两个悬

浮点(点 1 和点 2),电磁铁的电压电流关系方程为:

$$\begin{cases} \frac{u_1(t)}{2} = i_1(t)R + \frac{\mu_0 AN^2}{2\delta_1(t)} \dot{i}_1(t) - \frac{\mu_0 AN^2 i_1(t)}{2\delta_1^2(t)} \dot{\delta}_1(t) \\ \frac{u_2(t)}{2} = i_2(t)R + \frac{\mu_0 AN^2}{2\delta_2(t)} \dot{i}_2(t) - \frac{\mu_0 AN^2 i_2(t)}{2\delta_2^2(t)} \dot{\delta}_2(t) \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $R$  为电磁铁内部线圈的电阻,  $\dot{i}_1(t)$  和  $\dot{i}_2(t)$  为电流变化率,  $\dot{\delta}_1(t)$  和  $\dot{\delta}_2(t)$  为电气平均间隙的变化率。

### 1.2.3 悬浮模块动力学模型

定义  $\ddot{z}_E$  表示悬浮模块中心位置的加速度,  $\ddot{\theta}_E(t)$  为悬浮模块中心位置的角加速度,  $L_e$  为单个电磁铁线包的长度,  $I_l$  为悬浮模块的转矩,以顺时针方向为转动正方向,那么悬浮电磁铁的运动方程可表示为:

$$\ddot{z}_E = \frac{1}{2m_E} [F_{s1}(t) + F_{s1}(t) - F_{E1}(t) - F_{E2}(t)] + g \quad (6)$$

$$\ddot{\theta}_E(t) = \frac{L_e}{I_l} [F_{E1}(t) - F_{E2}(t) + 2F_{s2}(t) - 2F_{s1}(t)] \quad (7)$$

其中,  $F_{s1}$  和  $F_{s2}$  分别为车厢通过空气弹簧传递到悬浮电磁铁的力。空气弹簧可以等效为阻尼加弹簧的结构,它们的大小为:

$$\begin{cases} F_{s1}(t) = k_s \Delta_{s1}(t) + c_s \dot{\Delta}_{s1}(t) \\ F_{s2}(t) = k_s \Delta_{s2}(t) + c_s \dot{\Delta}_{s2}(t) \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\Delta_s$  为空气弹簧的形变大小,  $c_s$  为空气弹簧的阻尼系数。

### 1.2.4 车厢动力学模型

定义  $y_c(t)$  为车体的垂向位移,  $m$  为车体总质量,车体转动的车体角加速度记为  $\ddot{\theta}_c(t)$ 。那么车厢的动力学模型为:

$$\ddot{z}_c(t) = g + \frac{1}{m_c} [F_{s1}(t) + F_{s2}(t)] \quad (9)$$

$$\ddot{\theta}_c(t) = \frac{1}{I_c} [F_{s1}(t)l_{c1} + F_{s2}(t)l_{c2}] \quad (10)$$

### 1.2.5 闭环控制策略

悬浮系统是一个本质非线性的不稳定系统,因此有必要设计好控制器保证系统稳定悬浮再进行研究。为了探究轨道周期性不平顺带来的影响,得到普适性的结论。本研究应用了比例微分(Proportion Differentiation, PD),设计以 PD 为控制率的控制器,该类型控制器广泛应用于悬浮系

统的控制,具有普遍的工程应用背景<sup>[17-18]</sup>。其控制率为:

$$\begin{cases} \dot{i}_{\text{expl}}(t) = k_p [z_1(t) - z_0] + k_d [\dot{z}_1(t) - \dot{z}_{1d}(t)] + i_0 \\ \dot{i}_{\text{exp2}}(t) = k_p [z_2(t) - z_0] + k_d [\dot{z}_2(t) - \dot{z}_{2d}(t)] + i_0 \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $z_0$  表示期望悬浮间隙,  $k_p$  为 PD 控制的比例控制系数,  $k_d$  为 PD 控制的阻尼控制系数,  $\dot{z}_1(t)$  和  $\dot{z}_2(t)$  为悬浮间隙的微分量,  $\dot{z}_{1d}(t)$  和  $\dot{z}_{2d}(t)$  为轨道不平顺间隙的微分量。引入了稳态电流  $i_0$  作为补充,以这种磁浮控制中通用的控制策略作为研究的基础。

$$i_0 = \frac{z_0}{N} \sqrt{\frac{(m_V + 2m_E)g}{\mu_0 A}} \quad (12)$$

其中,  $m_V$  表示车体的质量,  $m_E$  表示悬浮电磁铁的质量。

同时以电流环作为系统内环反馈以提高系统的响应特性。

$$\begin{cases} u_1(t) = k_c [i_{\text{expl}}(t) - i_1(t)] + 2Ri_1(t) \\ u_2(t) = k_c [i_{\text{exp2}}(t) - i_2(t)] + 2Ri_2(t) \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $k_c$  为电流闭环的反馈系数,  $i_{\text{expl}}(t)$  和  $i_{\text{exp2}}(t)$  为悬浮控制点的期望电流。

至此,悬浮模块模型建立完成。

## 2 轨道不平顺对悬浮系统的影响分析

轨道的干扰从两个方面对悬浮系统造成影响。一方面,轨道不平顺直接加到传感器中,直接作用到系统的反馈环节中。另一方面,轨道不平顺影响悬浮点的平均间隙,从而对悬浮力造成扰动。其中第一类干扰是传感器可量测但是无法区分的干扰;第二类干扰是一种不可测、非线性的扰动。因为第二类扰动相对较小,普遍将它进行忽略或者等效于外力的干扰来讨论。

### 2.1 干扰输入对系统输出影响的分析

在第 1 节建立的磁浮系统模型的基础上,分析干扰信号对输出的影响。整理式(3)~(13),对它们线性化后,以  $z_{1g}, z_{2g}, z_{1d}, z_{2d}$  为输入,以  $z_1$  和  $z_2$  为输出,输出  $z_1, z_2$  的方程为:

$$\begin{cases} z_1(s) = T_1(s)z_{1d}(s) + T_2(s)z_{2d}(s) + T_3(s)z_{1g}(s) + T_4(s)z_{2g}(s) \\ z_2(s) = T_1(s)z_{2d}(s) + T_2(s)z_{1d}(s) + T_3(s)z_{2g}(s) + T_4(s)z_{1g}(s) \end{cases} \quad (14)$$

选用一组额定参数。  $T_1(s), T_2(s), T_3(s)$  和  $T_4(s)$  的波特图如图 6 所示。

首先,当激励频率较低(小于 20 rad/s 时),它们的幅值增益都比较小,相位基本无变化。因

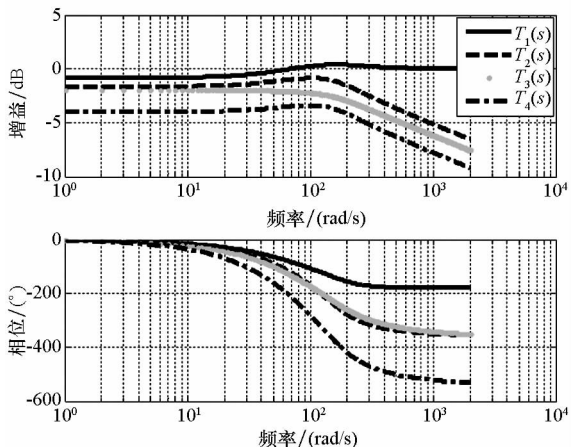


图6 传递函数波特图

Fig.6 Bode diagram of  $T_i(s)$

此,在低频段的输出以轨道不平顺的输入抑制为主,同时  $z_{1g}, z_{2g}$  的增益相对  $z_{1d}, z_{2d}$  很小,产生的是稳态的影响。其次,在激励频率大于 30 rad/s 小于 200 rad/s 时,各种输入的传递函数带来的增益影响开始迅速增大,同时其相位在这段区间内以不同的斜率变化。这意味着,输出在该区间内不仅幅值大小发生剧烈变化,而且会有极值出现。最后,在频率大于 200 rad/s 时,各项的幅值增益迅速下降,相位逐渐稳定在一个固定值。当系统受到高频激励时,主要的输出以  $z_{1d}$  影响为主,其他影响的幅值太小可以忽略。而  $z_{1d}$  的增益稳定在 0 dB,那么干扰输出就等于干扰输入  $z_{1d}$ 。

结合车辆系统的实际情况可知,当车辆以额定速度(80 km/h)运行时,长波周期不平顺,其波长约 11 m 和 18 m,将带来 4 rad/s 和 6 rad/s 左右的干扰激励。系统的悬浮间隙以跟踪为主,不会产生较大的波动。但是需要指出,该频率与车辆的自身频率接近,容易造成车辆的振动,因此,对于这类波长应当重点关注其带来的车厢加速度影响。另外一方面,对于短波不平顺,轨枕铺设带来的 1.25 m 波长的周期性不平顺,在车辆运行中产生从 0 rad/s 到 55 rad/s 的干扰激励,因此,在整个车辆运行过程中,该波长的影响是最大的,值得更加深入的研究。

### 2.2 轨道波长对间隙波动影响的数值分析

在 2.1 节对不同波长定性分析的基础上,进一步以数值分析的方式探究轨道波长和悬浮间隙波动幅值之间的关系。在列车运行速度  $v$  固定的情况下,轨道不平顺波长给系统带来的激励频率  $f = v/\lambda_i$ 。下面,将车辆速度设定为悬浮列车 80 km/h 的额定运行速度,研究波长与间隙波动范围的关系。图 7 为 80 km/h 下波长 - 间隙波动幅值图。

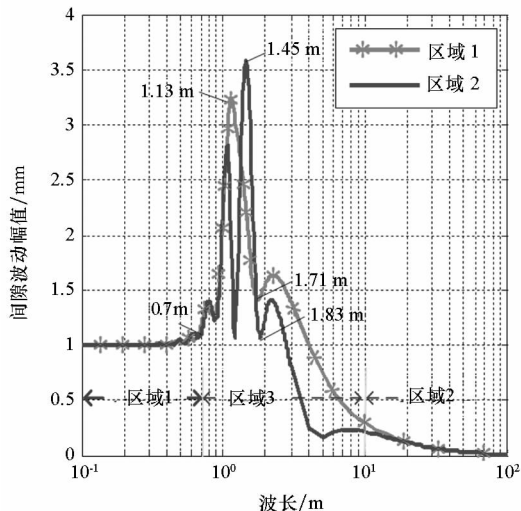


图7 80 km/h 下波长 - 间隙波动幅值图

Fig.7 Wavelength - gap fluctuation relationship under vehicle speed of 80 km/h

依据图 7 的输出曲线,可以分为三个部分讨论。

区域 1,  $\lambda_i \in (0 \text{ m}, 0.7 \text{ m}]$ 。该区域,间隙波动幅值基本等于 1 mm。这是因为此时对系统的激励频率  $\omega_i = 2\pi v/\lambda_i, \omega_i \in [200 \text{ rad/s}, +\infty)$ 。此时系统受高频激励,以传感器的输入干扰  $z_{1d}$  和  $z_{2d}$  影响为主。

区域 2,  $\lambda_i \in (10 \text{ m}, +\infty)$ 。在该区域,两点的悬浮波动间隙幅值逐渐递减趋于 0。在额定速度下,该区域波长对系统的激励频率  $\omega_i \in (0 \text{ rad/s}, 14 \text{ rad/s}]$ 。系统在低频段激励时,系统以跟踪为主,它不会带来悬浮间隙的大波动。

区域 3,  $\lambda_i \in (0.7 \text{ m}, 10 \text{ m}]$ 。该区域内,两点间隙波动幅值急剧变化,且间隙波动范围大。点 1 和点 2 的幅值波动多次相互交叉,出现多个极值。在车辆运行在额定速度时,该段区域波长将是影响幅值波动的重点区域。

磁浮轨道存在 18.2 m, 11.1 m, 1.25 m 三种周期性不平顺波长。对于 11.1 m 和 18.2 m 长度的轨道不平顺波,在车辆以额定速度运行时,其对间隙波动输出影响很小,可以不予以考虑。但是对于 1.25 m 周期性波长,处于区域 3 中,这个区域幅值增益最大、相位变化剧烈以及对输入影响强,因此该长度的周期性波长是影响系统稳定的敏感波长。磁浮轨道轨枕距离按照铺设要求,应当在 0.8 m 到 2 m 之内。小于 0.8 m,经济上将使得成本上升。大于 2 m,则难以达到磁浮列车运行的轨道要求。从图 7 可知,在 1.71 m 到 1.83 m 长距离的不平顺给系统带来的间隙波动处于极小值,这非常有利于间隙波动的减小。因

此,可以考虑将轨枕设计成 1.71 m 到 1.83 m 的铺设距离,以改善车辆的悬浮质量。

### 3 抑制轨道不平顺干扰策略

为了减小轨道不平顺带来的干扰,提高系统的稳定性和对干扰的抑制能力,本节分析了短波和长波两种轨道周期不平顺对系统的影响。针对轨枕带来的短波不平顺,从轨枕距离调整和控制参数调整两个角度提出改进建议。对轨道弹性带来的长波不平顺,分析了它对车厢振动加速度的影响,提出了减小振动的策略和建议。

#### 3.1 最优轨距下的悬浮波动影响

为了对比轨枕铺设距离对悬浮间隙波动的影响,在车辆运行的各种速度工况条件下,对两种轨枕铺设方案进行对比。对于 1.25 m 这个敏感波长对悬浮系统的影响,车辆运行的大部分时间在额定速度下,但是因为受到进出站的影响,速度在 0~80 km/h 之间都有分布。因此,有必要对各种速度条件下该波长带来的幅值波动影响,探究其带来的最大的幅值变化量,不同车速下间隙波动输出如图 8 所示。

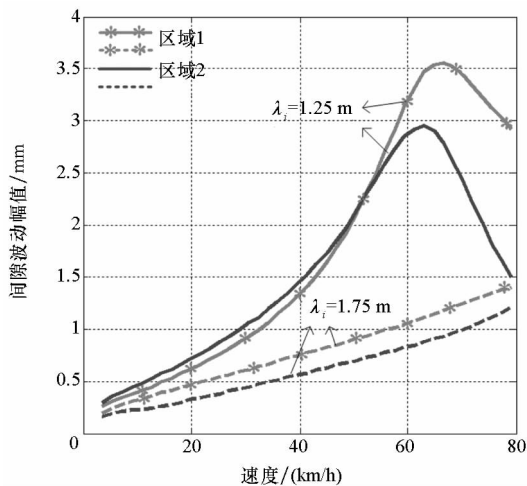


图 8 定波长下速度 - 间隙波动范围关系图  
Fig. 8 Speed - gap fluctuation relationship under fixed wavelength

在 1.25 m 波长下,速度低于 65 km/h 时,点 1 和点 2 的幅值波动变化随着速度的提高而增大,两点的波动大小相差不大。然后,两点先后在 65 km/h 附近达到最大值 3.5 mm。随着速度的进一步提高,悬浮间隙波动幅值开始下降,同时,点 2 的幅值波动大于点 1。

在系统模型、参数保持不变的条件下,调整轨枕的铺设长度为 1.75 m。显然,两点的间隙波动幅度大幅度降低,当然,这是非常有利于车辆运行

的安全性和稳定性的提高。这为工程实践提供了良好的参照,在符合工程要求的条件下,建议轨枕铺设距离设计为 1.75 m 的长度。

#### 3.2 现有轨距下控制参数优化

在实际工程中,例如唐山磁浮试验线,其轨道已经完成建设。其轨枕距离以 1.2 m 为主,针对这种情况,有必要探究其他的方法来抑制已有的波长带来的不平顺。从控制器设计的角度出发,对控制器 PD 参数调整,探讨参数的调整对系统间隙波动带来的影响。

为了进一步减小间隙波动的范围,下面在保证系统稳定的情况下,适当调整 PD 参数,对比参数变化情况下对间隙波动的影响。一方面,对于全部可能车速,在以固定波长 1.25 m 为激励下,研究调整参数后,其对系统输出的影响角度。另一方面,对于额定车速下,研究参数变化,系统在各种长度波长的激励下,其对悬浮间隙带来的影响。

如图 9 所示,保持  $k_p$  参数不变的情况下,将  $k_d$  减小为 70 时,在 1.25 m 波长周期性不平顺的激励下,系统间隙输出进一步增大,将影响悬浮系统的稳定运行。随着  $k_d$  从 80 增大到 120,其幅值波动变小。这说明,增大阻尼项,是有益于针对 1.25 m 波长干扰的抑制。额定速度 80 km/h 下,同样随着  $k_d$  的增大,对于各种波长的抑制明显增强。这说明,阻尼越大,越有利于提高幅值波动的抑制能力。

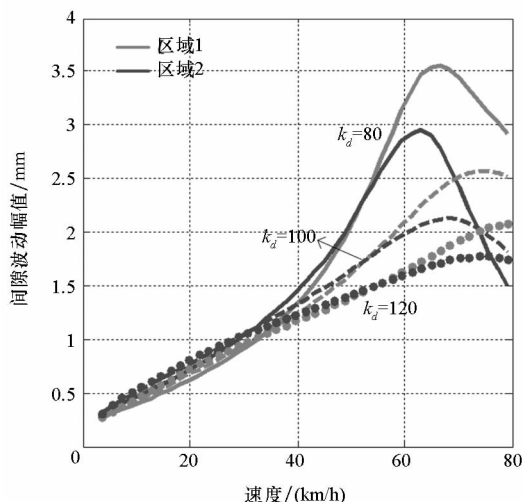


图 9 调整  $k_d$  对间隙波动的影响

Fig. 9 Gap fluctuation when  $k_d$  varying

将  $k_d$  参数保持为 80 不变,调整  $k_p$ 。如图 10 所示,当增大参数  $k_p$  时,间隙波动变大,系统的稳定性变差。而当减小  $k_p$  时,两点的间隙波动减小,有利于系统的稳定。由此可知比例项是影响

幅值增益的一个重要方面。在车辆稳定性的前提下,适当减小比例项有利于系统的抗干扰性能。

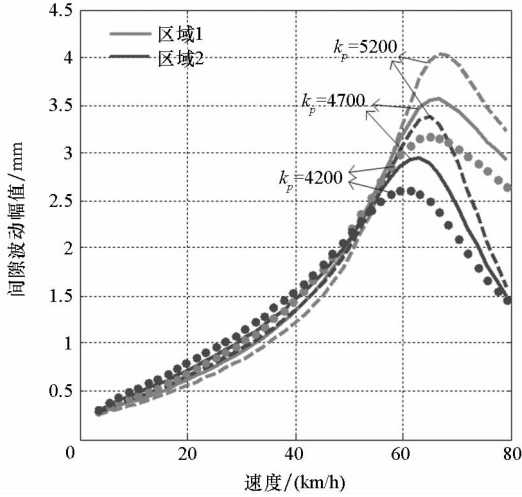


图 10 调整  $k_p$  对间隙波动的影响

Fig. 10 Gap fluctuation influence when  $k_p$  varying

显然,通过对控制器的参数调整的设计能够显著减小间隙的波动幅值,其中增大  $k_p$  和减小  $k_d$  是两个较好的方法。需要注意,控制器参数调整涉及对其他多个方面的影响,因此,调整的过程中,要在保证系统稳定运行的前提下进行。

### 3.3 轨道梁弹性形变对系统的影响及其优化建议

轨道梁的弹性形变造成长波不平顺,当车速与长波不平顺相互耦合时,极易产生与车辆固有频率相当的激励频率,从而造成车辆的受迫振动,这对车辆乘坐的舒适性是非常不利的。针对这一问题,分析了不同轨道梁跨距下,其带来的长波周期性不平顺对车辆垂向振动的影响。以其对垂向加速度影响角度指出了其合理的轨道梁铺设距离。

弹性轨道的形变存在一定的挠跨比,考虑到轨道梁设计的一致性,认为不同跨度的轨道梁具有同样大小的挠跨比  $1/3000$ 。在轨道梁设计中,存在多种跨距,以  $12\text{ m}$ ,  $18\text{ m}$  和  $24\text{ m}$  三种跨距为主。下面就以这三种跨距的轨道梁进行数值仿真,以车厢垂向加速度作为输出,其结果如图 11 所示。

从图 11 可见,当车速较低时,长波不平顺产生的是非常低频的激励,车辆予以缓慢的跟随;但是随着车速提高,轨道波长的激励也不断提高,而且变化剧烈,说明长波不平顺是影响车厢垂向振动的一个重要因素。另外一方面,对于不同长度轨道波长的影响来看,随着激励波长的增大,其对车辆的振动加速度影响减小。 $24\text{ m}$  长波长优于  $18\text{ m}$  长波长,  $18\text{ m}$  长波长优于  $11\text{ m}$  长波长。这

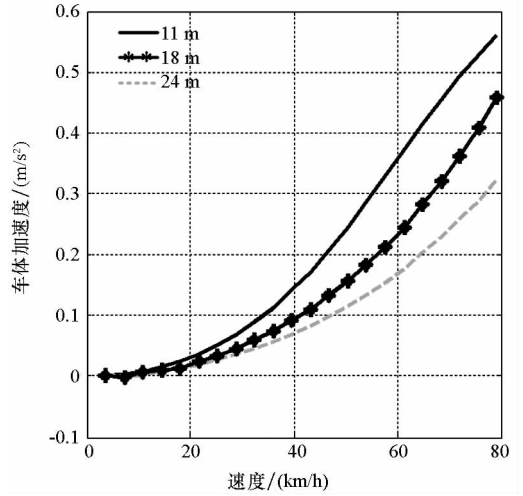


图 11 调整跨距对车体振动的影响

Fig. 11 Cabin acceleration when changing girder span

意味着,在磁浮轨道建设之中,可以考虑尽量使用长跨距的轨道结构,这将有利于车辆舒适性的提高。

## 4 结论

1) 轨道周期性不平顺对悬浮系统平均电气间隙的影响不能忽略,其影响体现在系统对中频段激励的响应。

2) 在  $80\text{ km/h}$  的额定车速下,  $0.7\sim 2\text{ m}$  波长的轨道不平顺波是悬浮系统的敏感波长,在该段波长激励下,悬浮间隙波动幅值剧烈变化,极易造成车辆不稳定,当予以重点研究。

3) 结合唐山磁浮轨道功率谱研究,指出现有轨道中  $1.25\text{ m}$  长轨道周期性不平顺对系统影响大,是需要研究的重点内容。对于  $11.1\text{ m}$  和  $18\text{ m}$  的长波不平顺,其对悬浮系统的干扰较小。

4) 考虑到磁浮中  $1.25\text{ m}$  长周期性不平顺是由  $1.2\text{ m}$  的轨枕铺设距离造成的。建议调整轨枕铺设距离到  $1.75\text{ m}$ , 改变轨道不平顺波长。相对于现有的  $1.2\text{ m}$  铺设距离,这将大大减小轨枕铺设带来的波长对悬浮间隙波动的影响,有利于车辆的安全稳定运行。

5) 针对现有的  $1.2\text{ m}$  轨枕铺设的轨道,在保证系统稳定运行的前提下,适当减小 PD 控制器中的比例项、增大阻尼,将有利于悬浮系统对该类型干扰的抑制。

6) 轨道梁弹性形变带来的长波不平顺对磁浮系统的间隙波动影响很小,更多是影响到了车厢的垂向加速度。而且轨道梁铺设距离的提高有利于减小其带来的振动加速度。在磁浮轨道铺设中,建议选用长跨距  $24\text{ m}$  作为轨道梁铺设距离。

7) 为了能够进一步深入分析, 下一步将建立整车模型, 对不同波长对系统的影响进行全面分析。还将考虑不同轨道波长对车轨、车梁耦合振动产生的影响, 充分考虑轨道梁在各种周期模态被激发的情况下对悬浮系统的影响。

## 参考文献 (References)

- [1] Alberts T E, Oleszczuk G. On the influence of structural flexibility on feedback control system stability for EMS maglev vehicles [C]// Proceedings of the 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, 2006.
- [2] 时瑾, 魏庆朝, 万传风, 等. 随机不平顺激励下磁浮车辆轨道梁动力响应[J]. 力学学报, 2006, 38(6): 850-857.  
SHI Jin, WEI Qingchao, WAN Chuanfeng, et al. Study on dynamic responses of high-speed maglev vehicle/guideway coupling system under random irregularity [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(6): 850-857. (in Chinese)
- [3] 张耿, 李杰, 杨子敬. 低速磁浮轨道不平顺功率谱研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(10): 73-78.  
ZHANG Geng, LI Jie, YANG Zijing. Estimation of power spectrum density track irregularities of low-speed maglev railway lines [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(10): 73-78. (in Chinese)
- [4] 龙志强, 郝阿明, 常文森. 考虑轨道周期不平顺的磁浮列车悬浮控制系统设计[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(2): 84-89.  
LONG Zhiqiang, HAO Aming, CHANG Wensen. Suspension controller design of maglev train considering the rail track periodical irregularity [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25(2): 84-89. (in Chinese)
- [5] Zhao C F, Zhai W M. Maglev vehicle/guideway vertical random response and ride quality [J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 38(3): 185-210.
- [6] Lee J S, Kwon S D, Kim M Y, et al. A parametric study on the dynamics of urban transit maglev vehicle running on flexible guideway bridges [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 328(3): 301-317.
- [7] Kong E, Song J S, Kang B B, et al. Dynamic response and robust control of coupled maglev vehicle and guideway system [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(25): 6237-6253.
- [8] Yau J D. Response of a maglev vehicle moving on a series of guideways with differential settlement [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 324(3/4/5): 816-831.
- [9] Wang H P, Li J, Zhang K. Vibration analysis of the maglev guideway with the moving load [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 305(4/5): 621-640.
- [10] Li J H, Li J, Zhou D F, et al. Self-excited vibration problems of maglev vehicle-bridge interaction system [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(11): 4184-4192.
- [11] Li J H, Li J, Zhou D F, et al. The active control of maglev stationary self-excited vibration with a virtual energy harvester [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2942-2951.
- [12] Li J H, Zhou D F, Li J, et al. Modeling and simulation of CMS04 maglev train with active controller [J]. Journal of Center South University, 2015, 22(4): 1366-1377.
- [13] Zhou D F, Hansen C H, Li J. Suppression of maglev vehicle-girder self-excited vibration using a virtual tuned mass damper [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(5): 883-901.
- [14] Zhou D, Li J, Hansen C H. Suppression of the stationary maglev vehicle-bridge coupled resonance using a tuned mass damper [J]. Journal of Vibration & Control, 2013, 19(2): 191-203.
- [15] 蒋海波, 罗世辉, 董仲美. 线路不平顺对低速磁浮车辆动态响应的影响 [J]. 铁道机车车辆, 2007, 27(3): 30-32.  
JIANG Haibo, LUO Shihui, DONG Zhongmei. Influence of track irregularity to the low-speed maglev vehicle dynamic response [J]. Railway Locomotive & Car, 2007, 27(3): 30-32. (in Chinese)
- [16] Liu D S, Li J, Zhang K. Design of nonlinear decoupling controller for double-electromagnet suspension system [J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32(3): 321-328.
- [17] Zou D S, She L H, Zhang Z Q, et al. Maglev vehicle and guideway coupling vibration analysis [J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 38(9): 2071-2075.
- [18] Wang Y, Qin Y, Wei X. Track irregularities estimation based on acceleration measurements [C]// Proceedings of International Conference on Measurement, Information and Control, 2012: 83-87.