

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412371

# 基于电磁铁复合线圈的磁浮车悬浮间隙检测方法

靖永志<sup>1,2,3</sup>, 刘沁宇<sup>1,2</sup>, 贾兴科<sup>1,2</sup>, 倪胜<sup>1,3</sup>, 杨亮涛<sup>1,3</sup>

(1. 磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室 成都 611756; 2. 西南交通大学电气工程学院 成都 611756;  
3. 西南交通大学唐山研究院 唐山 063000)

**摘要:**针对传统电涡流传感器体积大、无法直接测量真实电磁间隙等问题,提出了一种基于电磁铁复合线圈的磁浮车悬浮间隙检测方法。首先,分析了悬浮系统等效电磁间隙检测原理,针对电磁铁和F轨表面高频涡流对复合线圈磁场耦合作用建立了复合线圈等效阻抗模型。其次,通过有限元仿真优化了复合线圈激励频率和复合线圈间隙检测系统结构以提高检测灵敏度,设计了谐振检测电路和信号解调电路有效抑制了悬浮系统与间隙检测系统之间的串扰。最后,进行了静态性能测试和悬浮实验,校正后的线性度为0.4%,恒定间隙时静态输出最大波动峰峰值为89 μm,悬浮系统能够在给定间隙、阶跃扰动和偏移扰动的不同工况下稳定悬浮。实验结果表明,间隙检测的响应速度和检测误差均满足系统要求。

**关键词:**磁浮车;电磁铁;复合线圈;间隙检测

中图分类号: TP212 TH702 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## Method of levitation gap detection for maglev train based on electromagnet with a composite coil

Jing Yongzhi<sup>1,2,3</sup>, Liu Qinyu<sup>1,2</sup>, Jia Xingke<sup>1,2</sup>, Ni Sheng<sup>1,3</sup>, Yang Liangtao<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of Maglev Technology and Maglev Train, Ministry of Education, Chengdu 611756, China;  
2. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;  
3. Tangshan Institute, Southwest Jiaotong University, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** To address the problems of large volume, inconvenient to directly measure the real electromagnetic gap of traditional eddy current sensors, a method of levitation gap detection for maglev train based on electromagnet with a composite coil is proposed. Firstly, the equivalent electromagnetic gap detection principle for the levitation system is analyzed, and the equivalent impedance model of the composite coil is formulated for the coupling effect of electromagnet and high-frequency eddy currents in the surface of the F-rail on the magnetic field of the composite coil. Secondly, the excitation frequency and the structure of the levitation system based on the gap detection of the composite coil are optimized through finite element simulation to improve the detection sensitivity. The resonant detection circuit and signal demodulation circuit are designed to effectively suppress the crosstalk between the levitation system and the gap detection system. Finally, the static performance test and levitation experiment are carried out, the linearity is 0.4% after correction, the maximum fluctuation peak-to-peak value of the static output is 89 μm at constant gaps, the suspension system is capable of stabilizing the suspension under different operating conditions for a given gap, step disturbance and offset disturbance. The experimental results show that the response speed and detection error of gap detection meet the system requirements.

**Keywords:** maglev train; electromagnet; composite coil; gap detection

## 0 引言

磁悬浮列车是一种新型交通车辆,列车具有运行速

度高、节能环保、爬坡能力强等优点<sup>[1]</sup>,作为未来轨道交通发展的新势力,磁浮列车技术受到了越来越多的关注<sup>[2-3]</sup>。常导磁悬浮列车是利用电磁铁与轨道之间的电磁力相互作用来实现车辆稳定悬浮的,由于悬浮系统本

质上强耦合、非线性、不稳定,所以要求控制器能够快速响应悬浮间隙变化从而调节电磁铁电流,电磁铁电流产生相应大小的电磁力与列车重力实现动态平衡。为实现列车的稳定悬浮,悬浮控制器需要获得磁回路中电磁铁与F轨之间的气隙大小,即悬浮间隙。控制器根据特定的控制策略计算出相应的控制量并作用于电磁铁,最终保证列车悬浮在额定间隙。因此磁悬浮列车悬浮系统的间隙检测对保障列车运行安全具有重要意义。

磁浮列车悬浮间隙的测量是无接触式,一般采用专用的电涡流或电感式间隙传感器实现悬浮间隙检测<sup>[4-5]</sup>,传感器通过探头线圈与被测导体之间的电磁耦合效应来实现间隙的非接触检测,比较适合几毫米到几十毫米的测量范围。传统的间隙传感器检测的是电磁铁磁极端部与F轨表面之间的垂向机械间隙,当电磁铁偏移时该垂向机械间隙无法准确表示电磁铁与F轨所在磁回路的电磁间隙。

对于悬浮间隙检测方法的研究多集中在线圈结构、补偿算法、信号传输、自传感等新技术方面。文献[6]探讨了霍尔传感器和磁位移传感器在位置检测的应用,其线性度高且噪声低,但存在输出信号弱的问题。文献[7]提出了基于组合测量方式的新型位移传感方法,通过对磁场精确约束实现精密位移测量。文献[8]研究了悬浮间隙传感器进行信号传输时出现的加速度计故障诊断问题,提出了采用间隙微分信号进行反馈的容错方案。文献[9]提出一种跟踪微分器结合联合滤波的悬浮间隙信号处理方法,以消除传感器过轨道接缝时的信号畸变,提高了悬浮间隙检测的准确性。机器视觉也在悬浮间隙检测领域上有所应用,文献[10]提出一种基于计算机视觉的悬浮间隙测量方法,在磁浮球平台进行了闭环实验验证,但该方法对环境光的干扰较为敏感。

由于专用间隙传感器的引入,相应也增加了悬浮系统的成本和体积,间隙检测本质上也是一种位置或位移检测。近年来,自传感技术通过增强软件功能简化传感器检测中的辅助电路,在位置检测领域得到了广泛研究,这种自传感技术减小了系统成本还降低了电路的复杂度。文献[11]设计了一种基于电压电流模型的转子角度观测器模型,实现对转子位置的精确检测和换向误差的实时校正。文献[12]分析了自传感转子位移解调器在静态和动态线圈电流作用下的输出特性,验证解调器输出与转子位移的关系。文献[13]提出一种基于虚拟脉振高频注入法的永磁同步电机位置自传感检测方法,用来解决传统脉振高频输入法的过零点问题。文献[14]通过高速磁悬浮应用驱动器中的扩展状态观测器估算转子位置,但基于状态观测器的方法对参数变化较为敏感其鲁棒性较差。文献[15]采用了改进的空间矢量PWM控制策略和零电压矢量扩展方案来提取转子

位置,但位置误差大小取决于采样电流和电流导数的精度。自传感技术实现了系统传感与执行功能一体化,但需要对检测信号和控制信号进行解耦,同时存在鲁棒性和适用性差的问题。

综上所述,传统的悬浮间隙传感器和位置自传感技术均存在一定不足,本文提出一种基于电磁铁复合线圈的磁浮车悬浮间隙检测方法,将有检测功能的复合线圈绕制在U型电磁铁内侧磁极端部位置,并通以高频激励,通过谐振检测电路和信号解调电路提取间隙信号。首先对电磁铁复合线圈的电磁特性进行理论分析,其次利用有限元仿真模型对复合线圈几何参数与检测性能进行优化,设计了间隙信号检测电路并对系统的串扰和动态特性进行了分析,最后在磁浮车实验平台上进行了基于电磁铁复合线圈间隙检测的静态测试和悬浮实验。

## 1 基于复合线圈间隙检测的悬浮系统

基于电磁铁复合线圈间隙检测的磁浮车悬浮系统如图1所示。复合线圈绕制于U型电磁铁内侧磁极端部,与电磁铁线圈共用铁芯以实现其固定安装并与电磁铁共享磁路通道,用来检测电磁铁与F轨所在磁回路的电磁间隙作为悬浮间隙信号用于悬浮控制。传统悬浮系统的电涡流间隙传感器固定安装在电磁铁上,检测传感器探头与F轨凹槽下表面之间的距离,等效表征F轨与电磁铁之间的机械间隙,其值用于对比实验。

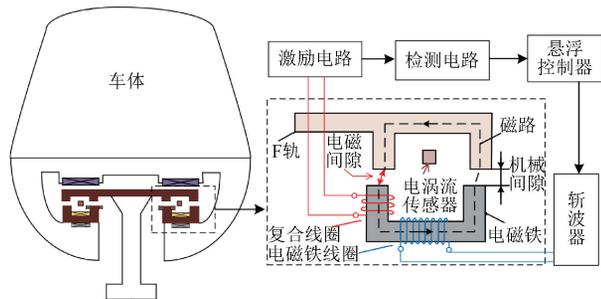


图1 基于复合线圈间隙检测的磁浮车悬浮系统

Fig. 1 Gap detection for the maglev train suspension system based on composite coil

当高频激励信号施加于复合线圈时,线圈周围产生的交变磁场在F轨表面感应出电涡流。根据楞次定律,电涡流也会产生交变磁场并阻碍线圈磁场磁通量的变化,涡流强度与间隙相关并影响复合线圈的等效阻抗。当复合线圈的几何参数、激励频率以及F轨的磁导率、电导率确定后,线圈的等效阻抗与悬浮间隙为单值函数关系,通过解调电路测量与间隙变化相关的电信号就可以得到悬浮间隙,悬浮控制器接收间隙信号并计算出相应

的控制量作用于斩波器,斩波器调整电磁铁电流实现悬浮力与列车重力的平衡,从而实现列车的稳定悬浮。

由于复合线圈和电磁铁线圈绕制在同一铁芯上,在分析复合线圈阻抗特性时,必须考虑电磁铁线圈对复合线圈等效阻抗的影响。为简化分析,取单电磁铁结构中的一个磁路回路进行特性分析,在建立悬浮系统数学模型时做如下假设:

- 1) 铁芯、气隙磁场、F 轨表面中的磁场均匀分布; 2) 忽略磁路漏磁通; 3) 电磁铁仅在竖直方向上运动。

根据磁路欧姆定律,线圈自感可表示为:

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{N^2}{R_m} \quad (1)$$

式中:  $\Phi$  为磁路磁通;  $I$  为线圈电流;  $N$  为线圈匝数;  $R_m$  为磁路磁阻。

假定磁阻均匀分布,则磁阻为:

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A_0} + \frac{2x}{\mu_0 A_1} \quad (2)$$

式中:  $l$  为铁芯磁路总长度;  $x$  为悬浮间隙;  $\mu_0$ 、 $\mu_r$  分别为真空磁导率和导磁材料相对磁导率;  $A_0$ 、 $A_1$  分别为铁芯截面积和间隙截面积。忽略边缘效应的情况下,即:

$$A_0 = A_1 = A \quad (3)$$

因此,忽略铁芯磁阻影响,可以得到复合线圈自感  $L_s$ 、电磁铁线圈自感  $L_p$  分别为:

$$\begin{cases} L_s = \frac{\mu_0 A N_s^2}{2x} \\ L_p = \frac{\mu_0 A N_p^2}{2x} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $N_s$ 、 $N_p$  分别为复合线圈和电磁铁线圈的匝数。

可知当悬浮间隙发生变化时,复合线圈磁路磁阻会随之变化,导致复合线圈自感变化,为提取间隙信号,需要建立复合线圈与电磁铁线圈等效电路模型,并分析复合线圈等效阻抗与悬浮间隙的特性关系。复合线圈与电磁铁线圈磁路耦合作用的 T 型等效电路如图 2 所示。

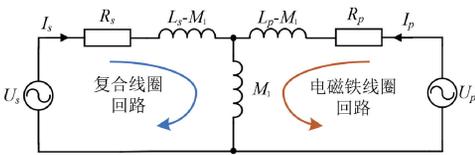


图 2 T 型等效电路

Fig. 2 T-type equivalent circuit

$L_s$ 、 $R_s$  分别为复合线圈的自感与内阻,  $L_p$ 、 $R_p$  分别为电磁铁线圈的自感与内阻,  $M_1$  为两线圈之间的互感,  $I_p$ 、 $I_s$  分别为两线圈的电流,  $U_p$ 、 $U_s$  分别为两线圈的端电压。

为分析复合线圈等效阻抗,由叠加定理可知,仅当复合线圈单独作用时,电磁铁回路电源等效短路,可得复合线圈两端的等效阻抗为:

$$Z_m = R_s + \frac{\omega^2 M_1^2 R_p}{R_p^2 + \omega^2 L_p^2} + j\omega \left( L_s - \frac{\omega^2 M_1^2 L_p}{R_p^2 + \omega^2 L_p^2} \right) \quad (5)$$

式中:  $\omega$  为  $U_s$  的角频率。通常来说,  $R_p \ll \omega L_p$ , 则式(5)可简化为:

$$Z_m = R_s + \Gamma_1^2 \frac{L_s}{L_p} R_p + j\omega(1 - \Gamma_1^2)L_s \quad (6)$$

式中:  $\Gamma_1$  为复合线圈和电磁铁线圈的互感系数。

为了分析电涡流效应对复合线圈等效阻抗的影响,建立复合线圈与 F 轨涡流回路耦合作用的等效电路如图 3 所示。

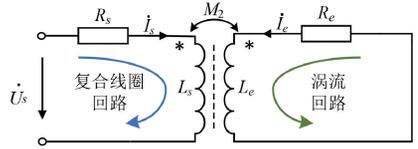


图 3 电涡流耦合作用等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of eddy current coupling action

$\dot{U}_s$  和  $\dot{I}_s$  分别为复合线圈的激励电源和线圈电流,  $\dot{I}_e$  为 F 轨表面产生的涡流,  $L_e$ 、 $R_e$  分别为涡流回路的等效电感和等效电阻,  $M_2$  为复合线圈与涡流回路的等效互感。在 F 轨表面产生电涡流回路可以看作单匝线圈,其与复合线圈通过磁场耦合影响复合线圈的等效电感。根据基尔霍夫定律有:

$$\begin{cases} \dot{U}_s = (R_s + j\omega L_s)\dot{I}_s - j\omega M_2 \dot{I}_e \\ 0 = -j\omega M_2 \dot{I}_s + (R_e + j\omega L_e)\dot{I}_e \end{cases} \quad (7)$$

求解方程组(7)可以得到复合线圈的等效阻抗为:

$$Z_c = \left( R_s + \frac{\omega^2 M_2^2 R_e}{R_e^2 + \omega^2 L_e^2} \right) + j\omega \left( L_s - \frac{\omega^2 M_2^2 L_e}{R_e^2 + \omega^2 L_e^2} \right) \quad (8)$$

综合式(6)、(8)可以得到受高频涡流磁场与电磁铁线圈磁场耦合下的复合线圈等效阻抗为:

$$\begin{cases} Z = R_s + \frac{\Gamma_1^2 N_s^2}{N_p^2} R_p + \frac{\mu_0 A_0 N_s^2 \omega^2 \Gamma_2^2 L_e R_e}{2x(R_e^2 + \omega^2 L_e^2)} + \\ j\omega \frac{\mu_0 A_0 N_s^2}{2x} \left( 1 - \Gamma_1^2 - \frac{\omega^2 \Gamma_2^2 L_e^2}{R_e^2 + \omega^2 L_e^2} \right) \\ R = R_s + \frac{\Gamma_1^2 N_s^2}{N_p^2} R_p + \frac{\mu_0 A_0 N_s^2 \omega^2 \Gamma_2^2 L_e R_e}{2x(R_e^2 + \omega^2 L_e^2)} \\ L = \frac{\omega \mu_0 A_0 N_s^2}{2x} \left( 1 - \Gamma_1^2 - \frac{\omega^2 \Gamma_2^2 L_e^2}{R_e^2 + \omega^2 L_e^2} \right) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\Gamma_2$  为复合线圈与涡流回路的互感系数,  $R$ 、 $L$  分别为复合线圈的等效电阻和等效电感。

可以看出在电磁铁磁路耦合影响下,复合线圈与电磁铁线圈通过互感  $M_1$  耦合,使复合线圈等效电阻增大而等效电感减小,当悬浮间隙  $x$  变化时,互感系数  $\Gamma_1$  随之变化,进而改变复合线圈的等效阻抗。在电涡流特性影响下,等效电感受两种效应的影响,一方面受静磁效应影响,复合线圈电感会随着悬浮间隙的减小而增大;一方面受涡流效应的影响,产生的反射电感与互感系数  $\Gamma_2$  相关,涡流效应与静磁效应对复合线圈等效电感的影响是相反的。随着悬浮间隙  $x$  的增大,涡流对线圈阻抗的影响减弱,  $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$  均会随之变化,使得复合线圈等效电阻减小而等效电感增大,因此可以通过检测复合线圈阻抗变化来提取悬浮间隙信号。

## 2 仿真分析与优化

复合线圈作为间隙检测的传感元件,需要具有较大的线性范围和较高的灵敏度,而复合线圈电感决定了其所能激发的磁场能量大小,直接影响间隙检测性能。由于复合线圈激励频率通常较高,线圈等效电感变化较等效电阻变化更为明显,所以主要探究复合线圈参数与等效电感的关。由于电磁铁横向偏移和电磁铁对中时垂向下移都使等效电磁间隙变大,悬浮控制器均会采用同样的控制策略调整电磁铁电流使系统自动恢复到居中额定悬浮间隙,因此仿真分析及系统标定均以电磁铁对中工况进行。建立基于复合线圈的悬浮电磁铁仿真模型如图4所示,F轨、悬浮间隙和U型铁芯构成闭合磁回路,复合线圈内部磁感应强度较大,其余区域磁感应强度逐渐减弱,主要仿真参数如表1所示。

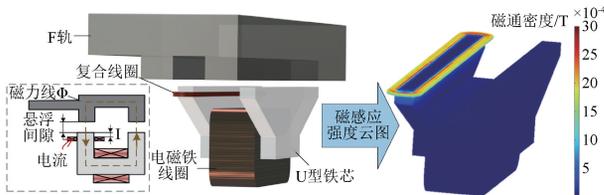


图4 基于复合线圈的悬浮电磁铁仿真图

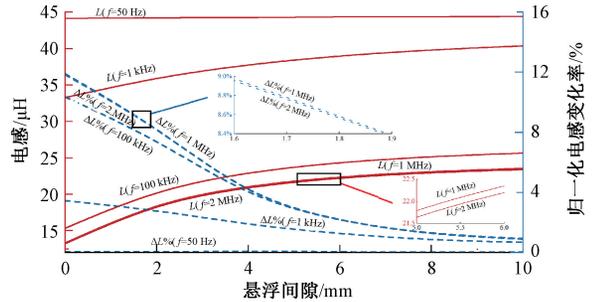
Fig. 4 Simulation graph of levitating electromagnet based on a composite coil

表1 仿真主要参数

Table 1 Simulation main parameters

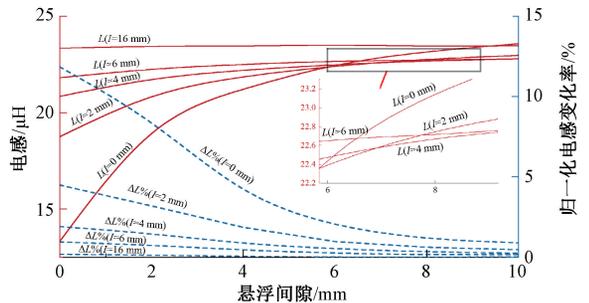
仿真参数	参数值
电磁铁磁极长度/mm	290
电磁铁磁极宽度/mm	15
电磁铁线圈匝数	525
复合线圈匝数	12
线圈材料	Copper
电磁铁材料	Q235
最大悬浮间隙/mm	10

当F轨及电磁铁铁芯的材料确定好后,激励频率会直接影响复合线圈的涡流强度,进而影响线圈的电感值。考虑到匝数过大,线圈电感增大导致电流对电压响应减慢将带来悬浮控制系统的迟滞<sup>[16]</sup>,所以尽量减小线圈匝数,综合考虑量程范围、灵敏度和动态响应速度对电感值的要求,线圈选用12匝。用归一化后的电感变化率来表征灵敏度,归一化电感变化率越大则灵敏度越高,复合线圈电感变化特性如图5所示。



(a) 不同激励频率下的复合线圈电感变化特性

(a) Characteristics of inductance variation of composite coil at different excitation frequencies



(b) 不同绕制位置下的复合线圈电感变化特性

(b) Characteristics of inductance variation of a composite coil with different winding positions

图5 复合线圈电感变化特性

Fig. 5 Compound coil inductance variation characteristics

如图5(a)所示,在同一间隙下,激励频率越高,复合线圈等效电感值越小。在50 Hz激励频率下的线圈等效电感随间隙的变化基本不变,在1 kHz频率以上,随着频率增大趋肤深度减小而涡流强度增大,复合线圈的电感随间隙的增大而增大,复合线圈灵敏度随频率增加而提高。考虑到2 MHz下的灵敏度提高不明显,故选用1 MHz作为激励频率。

如图5(b)所示,不同  $I$  的电感变化趋势一致,均随着间隙的增大而增大。悬浮间隙较小时,不同  $I$  的电感变化明显且随着  $I$  的增大而增大,随着间隙的增大,不同  $I$  下的电感变化不明显。当  $I$  增加时,复合线圈的电感变化范围逐渐变窄,电感相对变化量降低,线圈检测的灵敏度随之降低。当  $I$  为0 mm时的电感变化范围最宽,灵敏度最高,故选用将复合线圈绕制在电磁铁磁极顶部。

### 3 电路设计与特性分析

#### 3.1 信号解调电路

基于电磁铁复合线圈间隙检测的磁浮车悬浮系统硬件主要包括控制电路、斩波电路、间隙信号检测电路。间隙信号的提取需要设计同步解调电路,间隙信号检测流程如图 6 所示。

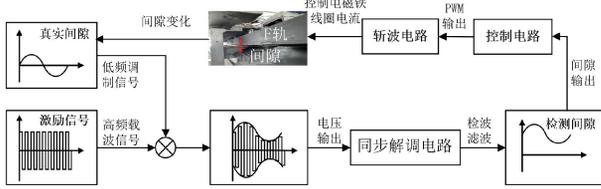


图 6 间隙信号检测流程

Fig. 6 Gap signal detection process

当复合线圈回路施加高频激励信号后, F 轨表面会生成电涡流,涡流强度受间隙影响,引起复合线圈的等效阻抗变化,复合线圈电压为涡流产生的感应电压与激励电压的叠加。将悬浮间隙变化引起的感应电动势看作调制信号,激励源产生的高频信号看作载波,则间隙信号检测的本质就是利用解调电路从变化的电压信号中还原出间隙信号。基于电磁铁复合线圈的磁浮车间隙检测系统主要由谐振回路、检波电路和滤波电路组成,间隙信号解调电路如图 7 所示。谐振电路是典型的信号转换电路,实现间隙信号到电压信号的转换。检波滤波电路用于提取高频信号中的低频分量,起到去除噪声、改善信号质量的作用。

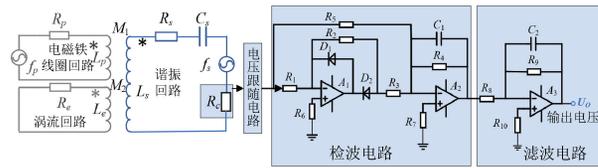


图 7 复合线圈间隙信号解调电路

Fig. 7 Composite coil gap signal demodulation circuit

在复合线圈回路中,复合线圈和谐振电容  $C_s$ 、分压电阻  $R_c$  串联构成谐振回路。激励源选择高频交流信号,在复合线圈远离 F 轨最大悬浮间隙时发生串联谐振,此时回路阻抗达到最小值,分压电阻输出电压幅值达到最大,当悬浮间隙减小后,电路失谐导致输出电压幅值变化,通过检波滤波电路处理分压电阻两端的电压就可以得到包含间隙信号的电压  $U_o$ 。

#### 3.2 系统串扰分析

由于复合线圈和电磁铁线圈共享磁路通道,磁路耦合导致两者之间存在串扰,具体表现为检测电流对悬浮系统的影响和悬浮电流对间隙检测系统的影响。

在考虑悬浮系统和检测系统之间的串扰时,涡流被视为检测系统本身的特性,由于系统间的控制相对独立,而且悬浮电磁铁距离涡流回路较远,所以悬浮系统受涡流影响弱,单独考虑复合线圈与电磁铁线圈耦合时,可以得到复合线圈和电磁铁线圈的回路阻抗分别为:

$$\begin{cases} Z_{pp} = R_p + sL_p \\ Z_{ss} = R_c + \frac{1}{sC_s} + sL_s + R_s \\ Z_{ps} = -\frac{(sM_1)^2}{Z_{ss}} \\ Z_{sp} = -\frac{(sM_1)^2}{Z_{pp}} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $Z_{pp}$  为电磁铁线圈的  $s$  域自阻抗,  $Z_{ss}$  为复合线圈的  $s$  域自阻抗,  $Z_{ps}$  为复合线圈回路反射到电磁铁线圈的  $s$  域反射阻抗,  $Z_{sp}$  为电磁铁线圈回路反射到复合线圈的  $s$  域反射阻抗。

分析悬浮电流对间隙检测系统影响时,高频激励源视为短路,电磁铁回路斩波器单独作用的等效电路如图 8(a) 所示,斩波频率  $f_p = 1$  kHz。分析检测电流对悬浮系统影响时,斩波器输出视为短路,高频激励单独作用的等效电路如图 8(b) 所示,  $f_s = 1$  MHz。

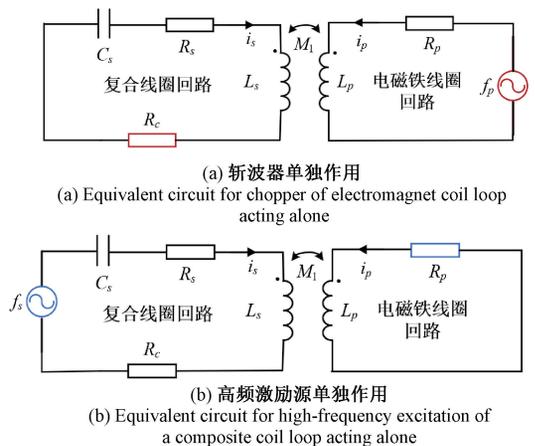


图 8 不同激励单独作用的等效电路

Fig. 8 Equivalent circuit with different excitations acting individually

复合线圈作为检测系统的传感元件,其电参数直接影响系统传递特性<sup>[17]</sup>。可以得到电磁铁回路斩波器输出到采样电阻上的传递函数  $G_1$  和复合线圈回路的高频

激励源到电磁铁线圈内阻上的传递函数  $G_2$  分别为:

$$\begin{cases} G_1 = -\frac{sM_1R_c}{Z_{pp}Z_{ss} - (sM_1)^2} \\ G_2 = -\frac{sM_1R_p}{Z_{pp}Z_{ss} - (sM_1)^2} \end{cases} \quad (11)$$

传递函数  $G_1, G_2$  的幅频特性如图 9 所示。

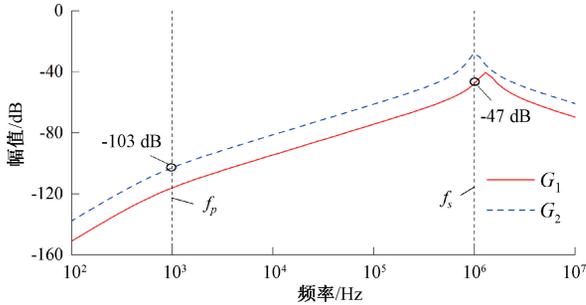


图 9  $G_1, G_2$  的幅频特性

Fig. 9 Amplitude-frequency characteristics of  $G_1, G_2$

可见,斩波器输出的高次谐波在采样电阻  $R_c$  上的衰减很大,在 1 MHz 频率下的幅值衰减为 -47 dB。表明斩波器输出的悬浮电流对检测系统影响非常小,因此悬浮电流在检测系统的串扰可以忽略不计。高频激励源的输出在电磁铁线圈内阻  $R_p$  上的衰减很大,在斩波频率 1 kHz 频率下的幅值衰减为 -103 dB,表明高频激励信号输出的检测电流对电磁铁线圈回路影响小,因此基于复合线圈的间隙检测系统在悬浮系统的串扰可以忽略不计。

综上所述,悬浮系统与间隙检测系统间的串扰被抑制的原因主要有两点。一是由于复合线圈回路的检测电流幅值小,电磁铁线圈在高频下的阻抗很大,导致复合线圈回路的间隙信号在电磁铁线圈回路中衰减大,所以检测系统对悬浮系统的影响很小。二是复合线圈检测频率远高于斩波频率,采用谐振回路能够有效抑制斩波器输出的高次谐波对检测系统的影响。

### 3.3 动态响应特性

虽然轨道涡流和电磁铁线圈与复合线圈存在磁场耦合,但其对复合线圈的动态特性影响小<sup>[18-19]</sup>,故不考虑它们对复合线圈检测系统动态特性的影响,此时复合线圈谐振回路的传递函数可表示为:

$$G_a = \frac{R_c}{(R_c + R_s + 1/(sC_s) + sL_s)} \quad (12)$$

检波回路和滤波器的传递函数分别为:

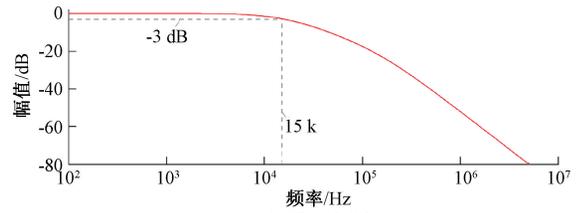
$$\begin{cases} G_b = -R_4/(R_4R_5C_1s + R_5) \\ G_c = -R_9/(R_8R_9C_2s + R_8) \end{cases} \quad (13)$$

复合线圈谐振回路、检波、滤波回路可以等效成 3 个串联的惯性环节,所以复合线圈间隙检测系统的整体传

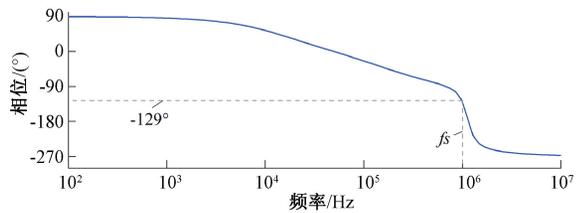
递函数  $G$  可表示为:

$$G = G_a G_b G_c \quad (14)$$

由此可得间隙检测系统的伯德图如图 10 所示。



(a) 幅频特性曲线  
(a) Amplitude-frequency characteristic curve



(b) 相频特性曲线  
(b) Phase-frequency characteristic curve

图 10 间隙检测系统的伯德图

Fig. 10 Gap detection system for Bode plots

在检测频率 1 MHz 时,如图 10(b)所示,最大滞后相位角为  $129^\circ$ ,相应的时域延迟  $0.35 \mu\text{s}$ 。如图 10(a)所示,系统带宽为 15.1 kHz,能够满足磁浮车悬浮控制系统对间隙检测采样频率的要求。

## 4 实验验证

为验证基于复合线圈间隙检测方法的有效性,搭建如图 11 所示的磁悬浮小车实验平台,对复合线圈间隙检测系统的静态和动态特性进行实验研究,实验参数如表 2 所示。



图 11 实验验证平台

Fig. 11 Experimental validation platform

表2 实验参数

Table 2 Experimental parameters

参数	数值
斩波器开关频率/kHz	1
复合线圈激励频率/kHz	1 000
电磁铁质量/kg	6
复合线圈匝数	12
电磁铁线圈匝数	525
电磁铁磁极面积/mm <sup>2</sup>	3 144.2
高频激励信号幅值/V	2.5

4.1 非线性校正

由电涡流传感器工作原理可知,其输入输出之间存在明显非线性关系,因此需要非线性校正环节以提高其测量范围和检测精度。非线性校正环节需要获得原始输入输出特性数据,设定悬浮间隙从0~10 mm之间变化,记录复合线圈信号解调电路输出的电压值,多次重复实验取平均值得到复合线圈原始输入输出特性如图12所示。

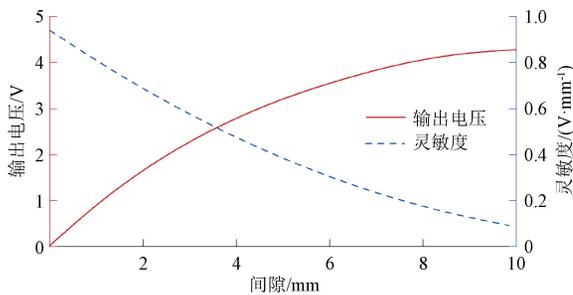


图12 原始输入输出特性

Fig. 12 Raw input-output characterization

间隙在0~10 mm变化时,解调电路输出电压范围为0~4.3 V,电压的灵敏度在满量程范围内为0.087~0.94 V/mm,灵敏度随着间隙的增大而减小,在0 mm时灵敏度达到最大值。因此可以看出复合线圈间隙检测系统有着严重的非线性,采用曲线拟合对间隙与输出信号进行非线性校正,不同阶次拟合校正误差如图13所示。

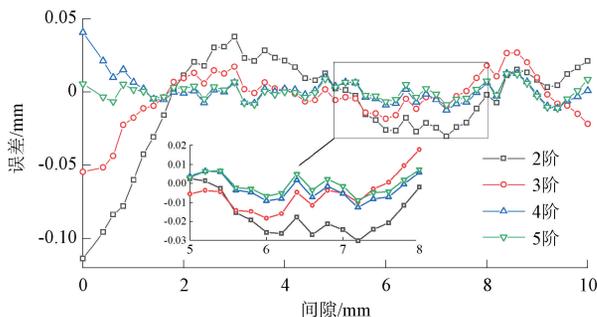


图13 非线性校正误差曲线

Fig. 13 Nonlinear correction error curve

校正后的误差主要分布在±0.05 mm以内,最大误差主要集中在0 mm最小间隙附近。拟合的阶数越高最大校正误差相对越小,考虑到计算成本和复杂度,本文选用4阶曲线拟合。校正后测量0~10 mm范围内最大误差为0.04 mm,相应线性度为0.4%,常用工作间隙6~8 mm范围内的最大误差为0.012 mm。

4.2 静态实验

为验证检测系统静态性能,分别测量复合线圈在3、6、10 mm不同间隙时的静态输出波动情况如图14所示。

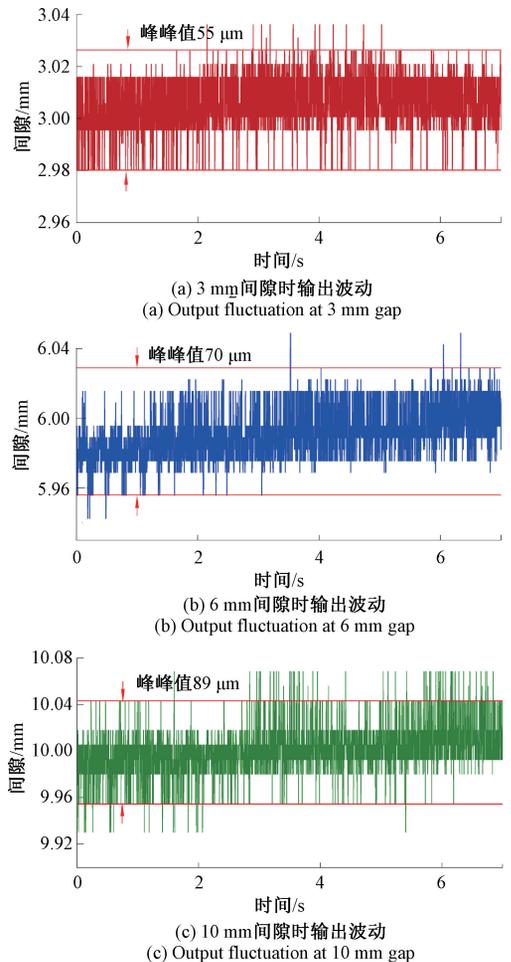


图14 不同间隙下的静态输出

Fig. 14 Static output at different gaps

可见复合线圈的静态输出在真实间隙范围附近波动,由于调节悬浮间隙会存在一定的机械误差,复合线圈信号解调电路的输出也会受到环境噪声带来的干扰,其在3、6、10 mm间隙处的输出峰峰值分别为55、70、89 μm。

4.3 悬浮实验

为验证复合线圈间隙检测系统的动态特性是否满足磁悬浮系统稳定控制要求,将基于复合线圈的间隙

检测结果接入悬浮控制器,开展基于复合线圈间隙检测的悬浮实验,同时采集同量程范围、0~5 V 输出、非线性误差为 1.5% 的传统电涡流传感器检测的间隙值作为参照,分别施加阶跃及偏移扰动的实验结果如图 15 所示。

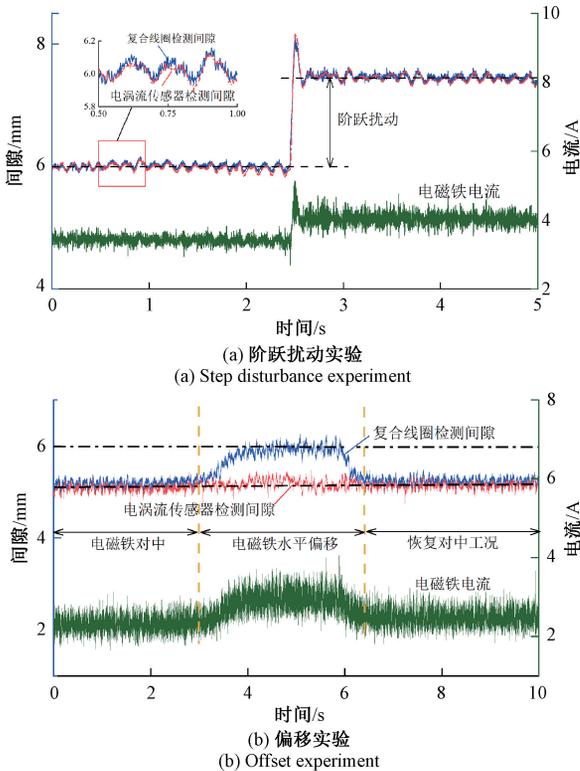


图 15 悬浮实验

Fig. 15 Levitation experiment

如图 15(a) 所示,磁浮小车在工作间隙 6 mm 时能够稳定悬浮,此时工作电流约为 3.5 A,其间隙输出与电涡流传感器的结果基本一致,当外加阶跃扰动使悬浮间隙变化到 7.5 mm 时,复合线圈能实时跟随间隙变化,具有较好的间隙跟踪性能,且其动态特性和稳定性均能满足磁浮车对间隙检测的精度要求<sup>[20]</sup>。表明基于电磁铁复合线圈的悬浮间隙检测方法能够抑制悬浮电流的干扰,实时准确地测量间隙值,且检测电流产生的微弱噪声也不会影响悬浮系统的稳定性。

如图 15(b) 所示,正常悬浮时电磁铁处于对中状态,复合线圈检测输出与电涡流传感器输出间隙基本一致,在 3 s 时,施加外力使电磁铁发生水平偏移,传统的电涡流传感器因其安装位置只能检测垂向机械间隙因此其检测值几乎保持不变,而复合线圈检测的是电磁间隙其输出随电磁铁偏移而增大,悬浮系统为保持稳定性同步增加悬浮电流。在 5.9 s 时,逐渐减弱外力干扰至偏移消失时复合线圈可以恢复至与电涡流传感器一样的原值。

## 5 结 论

针对传统电涡流传感器体积大、无法检测真实电磁悬浮间隙,而间隙自传感鲁棒性和适用性差等问题。本文提出了一种基于电磁铁复合线圈的磁浮车悬浮间隙检测方法,分析了间隙检测的理论依据,优化了复合线圈几何参数,验证了基于电磁铁复合线圈悬浮间隙检测系统在磁浮车中应用的可行性。结论如下:

1) 基于电磁铁复合线圈间隙检测方法充分利用电磁铁本体磁路检测真实电磁间隙。通过建立复合线圈等效阻抗模型分析了复合线圈阻抗变化特性的影响因素,为间隙信号检测及灵敏度优化提供了理论依据。

2) 设计的谐振检测电路和信号解调电路能够有效抑制悬浮系统和检测系统之间的串扰,复合线圈检测系统带宽为 15.1 kHz,在检测激励频率下的时域延迟为 0.35  $\mu\text{s}$ ,能够满足磁浮车悬浮控制系统对间隙检测动态特性的要求。

3) 引入非线性校正环节提高了线性度和检测精度,校正后在满量程范围内最大误差为 0.04 mm,线性度为 0.4%。静态测试与悬浮实验结果表明,复合线圈间隙检测系统输出稳定且不受悬浮电流串扰影响,阶跃及偏移扰动时均能有效识别悬浮系统磁回路电磁间隙,提高了悬浮系统的稳定性。

## 参考文献

- [1] LI F, SUN Y, XU J, et al. Control methods for levitation system of EMS-type maglev vehicles: An overview [J]. Energies, 2023, 16(7): 2995.
- [2] 张文静, 南楠, 曹博文, 等. 基于周期自适应学习的中低速磁悬浮列车运行控制方法 [J]. 铁道学报, 2021, 43(6): 88-94.  
ZHANG W J, NAN N, CAO B W, et al. Operation control method for medium-low-speed maglev train based on periodic adaptive learning [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(6): 88-94.
- [3] 张文静, 曹博文, 李宽欣, 等. 中速磁悬浮列车的分数阶运行控制方法 [J]. 铁道学报, 2022, 44(2): 42-48.  
ZHANG W J, CAO B W, LI K X, et al. A fractional order operation control method for medium-speed maglev trains [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(2): 42-48.
- [4] FAN X H, CHEN T, HE Y T, et al. An excitation coil layout method for improving the sensitivity of a rosette

- flexible eddy current array sensor [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(1):1-16.
- [5] 张新雨,王露,宋念龙,等.基于电涡流传感器的温度位移智能检测方法[J].*传感技术学报*,2020,33(8):1176-1182.
- ZHANG X Y, WANG L, SONG N L, et al. Intelligent detection method of temperature and displacement based on eddy current sensor [J]. *Chinese Journal of Sensing and Actuators*, 2020, 33(8):1176-1182.
- [6] ASADULLAH M K, JIAN S, BODONG L, et al. Magnetic sensors-A review and recent technologies [J]. *Engineering Research Express*, 2021, 3(2):022005.
- [7] 杨继森,熊浩,文杰,等.基于气隙磁场分层耦合的直线时栅位移传感器研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(6):116-125.
- YANG J S, XIONG H, WEN J, et al. Research on linear time-grating displacement sensor based on stratified coupling of air gap magnetic field [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(6):116-125.
- [8] 陈自然,张桁潇,刘小康,等.基于组合测量方式的新型磁场式时栅位移传感器 [J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(6):107-115.
- CHEN Z R, ZHANG H X, LIU X K, et al. Novel magnetic-field type time-gating displacement sensors based on a combined measurement method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(6):107-115.
- [9] 张文跃,佟来生,王滢,等.跟踪微分器在磁浮列车悬浮间隙处理中的应用 [J]. *城市轨道交通研究*, 2021, 24(3):26-29.
- ZHANG W Y, TONG L SH, WANG Y, et al. Application of tracking differentiator in maglev train suspension gap disposal [J]. *Urban Mass Transit*, 2021, 24(3):26-29.
- [10] JING Y Z, MA X C, ZHANG Z F, et al. Research on visual measurement for levitation gap in maglev system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(8):8377-8386.
- [11] 朱俊杰,黄海燕.无位置传感器无刷直流电机换相误差校正系统研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(4):41-49.
- ZHU J J, HUANG H Y. Study on the commutation error correction system of position sensorless brushless DC motor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(4):41-49.
- [12] 于洁,祝长生,余忠磊.自传感电磁轴承位移解调过程的精确建模和分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(21):5939-5946, 6038.
- YU J, ZHU CH SH, YU ZH L. The precise modeling and analysis of demodulation approach in self-sensing active magnetic bearings [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(21):5939-5946, 6038.
- [13] 吕晓源,刘刚,毛琨,等.基于虚拟脉振高频注入法的永磁电机初始位置检测 [J]. *电工技术学报*, 2017, 32(23):34-41.
- LYU X Y, LIU G, MAO K, et al. Initial position detection of permanent magnet motor based on virtual pulsating high-frequency injection method [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(23):34-41.
- [14] ZHU J, GE Q, SUN P. Extended state observer-based sensorless control for high-speed maglev application in single-feeding mode and double-feeding mode [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 8(1):1350-1361.
- [15] WANG G, KUANG J, ZHAO N, et al. Rotor position estimation of PMSM in low-speed region and standstill using zero-voltage vector injection [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 33(9):7948-7958.
- [16] 李满宏,王经天,吴玉,等.电涡流传感器性能优化关键技术 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(7):233-243.
- LI M H, WANG J T, WU Y, et al. Key technologies for performance optimization of eddy current sensors [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(7):233-243.
- [17] 张晓东,吴斌,刘秀成,等.电磁感应线圈电特性研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(13):3963-3971.
- ZHANG X D, WU B, LIU X CH, et al. Study on electrical characteristics of electromagnetic induction coil [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(13):3963-3971.
- [18] JING Y Z, WANG S, LIU Q Y, et al. Gap self-sensing method for maglev system using partial electromagnetic coil [J/OL]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023. [2023-08-04]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10122848>.

- [19] 丛华,张德魁,安钢. 电涡流传感器动态响应特性研究[J]. 仪表技术与传感器,1999(9):1-3.  
CONG H, ZHANG D K, AN G. Research on dynamic characteristic of eddy current sensor[J]. Instrumentation Technique and Sensor,1999(9):1-3.
- [20] 张刘泽,吴峻. 中低速磁悬浮列车电涡流间隙传感器设计[J]. 仪表技术与传感器,2010(1):1-3,17.  
ZHANG L Z, WU J. Design of eddy current sensor for low-speed maglev vehicle[J]. Instrument Technique and Sensor,2010,(1):1-3,17.

### 作者简介



靖永志(通信作者),2005年于西南交通大学获得硕士学位,2014年于西南交通大学获得博士学位,现为西南交通大学电气工程系副研究员、硕士生导师,主要研究方向为磁浮列车、传感器技术及人工智能系统。

E-mail: jingyongzhi@swjtu.edu.cn

**Jing Yongzhi** (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2005 and received his Ph. D. degree from Southwest Jiaotong University in 2014. He is currently an associate research fellow and a master advisor at Southwest Jiaotong University. His main research interests include maglev train, sensor technology, and artificial intelligence system.



刘沁宇,2021年于湖南工业大学获得学士学位,现为西南交通大学硕士研究生,主要研究方向为磁浮列车及传感器技术。

E-mail: lqy03182031@163.com

**Liu Qinyu** received his B. Sc. degree from Hunan University of Technology in 2021. He is currently a master student at Southwest Jiaotong University. His main research interests include maglev train and sensor technology.