DOI: 10.3901/JME.2019.12.149

线圈串接方式对悬浮控制性能的影响仿真*

张敏¹ 马卫华¹ 李铁² 罗世辉¹

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031;

2. 中车大连机车车辆有限公司 大连 116021)

摘要: 中低速磁浮列车每个悬浮模块包含四个电磁铁线圈, 一般采用两端线圈串联的方式分别与一个控制器构成悬浮控制回路, 称为一、二位连接方式(C12)。为提高磁浮车辆的悬浮性能, 改善运行过程中的触轨和悬浮失效等问题, 目前大部分研究从优化悬浮控制系统入手。从外部连接出发寻找较优的串接方式, 提出一种新型的一、三位连接方式(C13), 通过动力学和电磁仿真将两种连接方式进行详细的对比。研究结果表明: 在通过相同轨道垂向激励时, 一、三位连接方式悬浮架与轨道的最小距离更大, 即离轨道更远; 用于调整的控制器的平均电流更低。所以从安全性和线圈发热考虑, 一、三位连接方式优于一、二位。提出一种新型的线圈连接方式, 证明了其优越性, 可为工程应用提供选择依据。

关键词: 中低速磁浮; 电磁铁; 连接模式; 气隙磁密; 电流均值

中图分类号: U270

Simulation of the Influence of Coil Connectionmode on Levitation Control Performance

ZHANG Min¹ MA Weihua¹ LI Tie² LUO Shihui¹

(1. Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

2. China Railway Group Dalian Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Dalian 116021)

Abstract: In the medium-low speed maglev vehicle, each levitation module contains four electromagnet coils. Generally, two adjacent coils at the module end in series with one controller, which is called control mode of series connection in the 1st and 2nd coils (C12). In order to enhance the levitation performance and improve the problems such as touching the rail and levitation failure in the process of running, many researches start from levitation control system optimization. The external connection mode is started from, and a new type of control mode of series connection in the 1st and 3rd coils (C13) is proposed. Many detailed comparisons of the two modes are made by dynamic and electromagnetic simulation. When passing through the same rail excitation, the results show that the minimum distance between the levitation frame and the rail in C13 is larger than that in C12, that is, farther from the rail; the average current of the controller in C13 is lower. Therefore, considering the safety and coil overheating, C13 performs better than C12. A new type of coil connection mode is proposed and its superiority is proved, which provides a basis for engineering applications.

Key words: medium-low speed maglev; electromagnet; connection mode; air gap magnetic flux density; mean value of the current

0 前言

悬浮和牵引是磁浮列车^[1]的两大关键技术, 悬浮稳定性和可靠性直接影响到磁浮列车运行的安全性。为了提高中低速磁浮车辆的悬浮性能, 降低悬浮失效的发生概率, 研究学者针对悬浮控制器部分做了大量工作, CUI 等^[2]在合理假设的基础上, 设

计了一种对外界干扰具有补偿功能的悬浮控制器。LIU 等^[3]针对悬浮系统的非线性特征, 设计了一种非线性悬浮控制器。LI 等^[4]研究了悬浮模块的数学模型, 并与当前反馈进行了比较, 分析了磁通反馈控制方案的优点, 开发了基于悬浮模块数学模型的磁通反馈控制器。鲍佳等^[5]建立了单电磁铁悬浮导向的模块化仿真系统, 研究悬浮导向系统控制方法与参数对磁浮车辆动力学性能的影响。黎松奇等^[6]基于单电磁铁悬浮系统动力学模型, 分析了悬浮控制算法及各主要参数对悬浮稳定性的影响, 给出了各主要参数与悬浮稳定性关系的表达式。龙志强

* 国家重点研发计划(2016YFB1200601-A03, 2016YFB1200602-13)和国家重点实验室自主研究课题(2016TPL_T03)资助项目。20180525 收到初稿, 20181217 收到修改稿

等^[7]从被动容错控制角度出发,设计了悬浮控制系统在故障条件下的容错控制器。YANG 等^[8]通过适当地设计干扰补偿增益,提出了一种新颖的复合控制器,能显著改善扰动抑制和抗负载变化的鲁棒性。LIU 等^[9]采用反馈线性化控制方法将系统线性化,然后采用 PD 控制算法进行控制,显著提高了磁浮列车的适应能力。

电磁铁设计优化方面,刘国清等^[10]针对 HSST 型磁浮列车采用的悬浮电磁铁进行了优化设计,对改进后的悬浮电磁铁进行了变形量的解析分析和电磁力的仿真分析,结果表明改进后的悬浮电磁铁不仅能够增加磁浮列车悬浮能力,同时也能有效地降低悬浮电磁铁的变形量。刘少克等^[11]利用 ANSOFT 对悬浮电磁铁磁场进行了三维和二维仿真。刘慧敏等^[12]利用 ANSYS 对电磁铁进行了二维仿真,得到电磁力随气隙和电流强度变化的规律。LIU 等^[13]提出了一种将永磁体与励磁线圈结合的新型电磁铁结构,并对其进行了二维和三维仿真计算。CHEN 等^[14]考虑感应涡流的影响,根据电磁学理论计算了随着速度的提高悬浮力的变化以及车辆所阻力的大小,发现当列车速度达到 200 km/h 时,悬浮力损失达 35.6%。DING 等^[15]采用三维数值分析方法,以长沙磁浮列车为背景,分析了感应涡流对悬浮力的影响。通过分析,当速度达到 160 km/h 时,头车的悬浮力损失 22%。郑丽莉等^[16]提出了在电磁铁前端附加永磁铁的方法来减弱涡流效应的影响,并借助专业电磁仿真软件 Maxwell 对单铁模型进行三维瞬态磁场仿真,验证该方法的有效性。ZHANG 等^[17-18]提出一种新型的悬浮架结构,并建立了对应的动力学模型,通过理论、仿真、试验各方面对比分析表明新型悬浮架具有更好的悬浮性能。

上述分析主要从悬浮控制系统内部及电磁铁结构出发,寻找措施提高高速磁浮车在受到外界干扰时的悬浮稳定性。为探索更好的连接方式,以充分发挥悬浮控制系统的性能,提高车辆悬浮能力,本文从外部连接方式出发,研究不同线圈连接方式纵向气隙磁密的不同分布,致使悬浮模块表现出不同的运动状态,呈现出不同的线圈电流消耗。针对两种不同的连接方式分析悬浮模块动态特性,以动力学和电磁仿真的方式探究不同线圈连接方式对悬浮性能的影响。

1 悬浮模块连接模式

磁浮列车通常由 5 个独立悬浮架及车体组成,每个悬浮架由 2 个悬浮模块和 2 套抗侧滚梁组成。

每个悬浮模块由 2 块极板、4 个电磁铁线圈组成,1 节车共有 20 套悬浮控制回路。工作时两端相邻线圈串联一起与悬浮控制器构成一套悬浮控制回路,2 个传感器分别置于悬浮模块的两端。

电磁铁一、二位连接模式即第一个和第二个线圈串联,第三个和第四个线圈串联进行控制,目前中低速磁浮列车悬浮电磁铁多采用这种连接方式(图 1a)。4 个电磁铁线圈还有多种连接模式,包括 4 个线圈全部串联在一个悬浮控制器上;一、四位串联,二、三位串联;一、三位串联,二、四位串联;4 个电磁铁线圈分别单独由一个控制器控制等方式。本文选择控制性能更有可能优于常用连接方式的一、三位串联方式(图 1b),即第一位线圈与第三位线圈串联在第一个控制器(前端控制器)上,第二位线圈和第四位线圈串联与第二个控制器(后端控制器)相连。基于相同的控制系统,对比悬浮模块在两种连接模式下运动过程的差异,分析造成此种差异的原因。

图 1 两种连接模式

2 悬浮模块运动方程

电磁铁的受力如图 2、3 所示,不考虑极板的横

向错位, 其运动包含纵向随列车运行(x 方向), 垂向(z 方向)运动以及绕质心的转动; G 位置为考虑车体与吊挂装置以及悬浮模块自身的重心, 当 $l_1=l_2$ 时, G 无偏心, 当 $l_1 \neq l_2$ 时, 存在偏心。各参数含义详见表 1。

图2 电磁铁振动简化模型

图3 电磁铁静力耦合坐标

表1 公式参数表

参数	参数	参数
1、2 位线圈中心 距离 a_{12}/m	质量 m/kg	气隙面积 S/m^2
2、3 位线圈中心 距离 a_{23}/m	转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	真空磁导率 $\mu_0/(\text{H}/\text{m})$
3、4 位线圈中心 距离 a_{34}/m	磁感应强度 B/T	磁场强度 $H/(\text{A}/\text{m})$
重心与极板前端 距离 l_1/m	线圈匝数 $N/\text{匝}$	气隙体积 V/m^3
重心与极板后端 距离 l_2/m	瞬时电流 $i_{(t)}/\text{A}$	带方向的悬浮力 F_l/N
极板重心垂直方向 位移 z/m	磁阻 $R_{(t)}/\text{H}$	悬浮力绝对值 $F_{\text{levitation}}/\text{N}$
转动角度 θ/rad	气隙高度 $\delta_{(t)}/\text{m}$	重力 $G/(\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2)$

垂向力包括车体、吊挂装置等施加到悬浮模块的力以及模块自身的重力(沿 z 正向), z 轴负方向的力则只有悬浮电磁铁产生的悬浮吸力。悬浮模块的两个运动方程为

$$m\ddot{z} = -k_{1(t)}(z + l_1\theta) - k_{2(t)}[z + (l_1 - a_{12})\theta] - k_{3(t)}[z - (l_2 - a_{34})\theta] - k_{4(t)}(z - l_2\theta) \quad (1)$$

$$J\ddot{\theta} = -k_{1(t)}(z + l_1\theta)l_1 - k_{2(t)}[z + (l_1 - a_{12})\theta](l_1 - a_{12}) + k_{3(t)}[z - (l_2 - a_{34})\theta](l_2 - a_{34}) + k_{4(t)}(z - l_2\theta)l_2 \quad (2)$$

矩阵表示为

$$\begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & J \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} z \\ \theta \end{Bmatrix} = 0 \quad (3)$$

$$b_{11} = k_{1(t)} + k_{2(t)} + k_{3(t)} + k_{4(t)} \quad (4)$$

$$b_{12} = k_{1(t)}l_1 + k_{2(t)}(l_1 - a_{12}) - k_{3(t)}(l_2 - a_{34}) - k_{4(t)}l_2 \quad (5)$$

$$b_{21} = k_{1(t)}l_1 + k_{2(t)}(l_1 - a_{12}) - k_{3(t)}(l_2 - a_{34}) - k_{4(t)}l_2 \quad (6)$$

$$b_{22} = k_{1(t)}l_1^2 + k_{2(t)}(l_1 - a_{12})^2 + k_{3(t)}(l_2 - a_{34})^2 + k_{4(t)}l_2^2 \quad (7)$$

$k_{n(t)}$ ($n=1,2,3,4$) 为四个电磁铁线圈的瞬时等效弹簧刚度。

模块的质量矩阵为对角阵, 而刚度矩阵不是对角阵, 则其运动微分方程是耦合的, 意味着垂向运动始终伴随着刚体转动, 反之亦然。所以悬浮模块是不稳定的, 需要加以控制调整才能达到动态平衡。

3 气隙磁场分析

基于 F 轨与极板之间的气隙磁密分布及其特征, 方能计算对应工况的悬浮力和转矩, 对控制系统实现悬浮模块动态调整过程中的力变化状态进行分析, 以对比两种线圈串接方式下气隙分布力的不同导致的调整效果的不同。

悬浮模块的运动过程始终伴随着一个关键的物理量——气隙磁密, 气隙磁密是控制转换过程中的重要环节, 是电流转换为力的桥梁。气隙磁密与气隙、线圈电流及力的关系如下

$$B = \frac{Ni_{(t)}}{R_t} = \frac{\mu_0 Ni_{(t)} S}{2\delta_{(t)}} \quad (8)$$

$$E = \frac{BHV}{2} = \frac{\mu_0 N^2 i_{(t)}^2 S}{4\delta_{(t)}} \quad (9)$$

$$F_l = -\frac{\partial E}{\partial \delta} = -\frac{\mu_0 N^2 i_{(t)}^2 S}{4\delta_{(t)}^2} = -\frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (10)$$

式中, B 为磁密, $\delta_{(t)}$ 为气隙, $i_{(t)}$ 为电流, F_l 为电磁吸力, 各符号含义, 详见表 1。综合上述公式可得: 气隙磁密的大小与电流和气隙的比值成正比; 悬浮力的大小与电流与气隙比值的平方成正比; 悬浮力与气隙磁密的平方成正比。当极板无横向错位时, 悬浮力的大小只与气隙磁密的大小有关, 磁密越大, 吸力越大, 且吸力呈磁密平方倍数变化。为分析悬浮模块各运动状态下的气隙磁密分布, 以及求解其具体值, 对 F 轨与电磁铁进行三维电磁分析, 三维有限元模型如图 4 所示。此处分析其静悬状态, 参数设置如表 2 所示。

悬浮电磁铁线圈通电产生感应磁场, 磁感线经过铁芯、极板、气隙、F 轨形成闭合回路。静悬时极板与 F 轨气隙之间纵向磁密分布如图 5 所示, 极板与 F 轨之间的气隙磁密具有如下特征。

图 4 电磁铁与 F 轨三维有限元模型

表 2 电磁分析模型主要参数表

参数	数值	参数	数值
1、2 位线圈中心距离 a_{12}/m	0.665	电流 i/A	30
2、3 位线圈中心距离 a_{23}/m	0.760	线圈匝数 N	320
3、4 位线圈中心距离 a_{34}/m	0.665	气隙 $\delta_0/(\text{g}/\text{m})$	0.008
电磁铁长度 l_f/m	0.465	极板长度 l_p/m	2.8
F 轨宽度 w/m	0.22	极板厚度 t/m	0.028

图 5 气隙磁密纵向分布

(1) 气隙磁密沿纵向相对于中心对称，最大值发生在靠近极板两端的线圈端部，每个线圈的两端出现该线圈对应区域的极值，说明单个线圈在气隙中形成的纵向磁场是两端大中间小。

(2) 一、二位线圈之间及三、四位线圈之间的极值比对应线圈另一端的小，说明两个线圈之间的磁场交汇处是相互削弱的，磁通矢量之和小于标量之和。

(3) 由于极板中间设孔用于放置制动装置，且中间二、三位线圈之间的距离比两端相邻线圈之间的距离大，造成极板中间气隙磁场较弱，只有 0.65 T，但二、三位线圈靠近彼此端的磁密略大于另一端的磁密，证明两个线圈之间保留一定的距离可以减小对单个线圈磁密的削弱。

气隙磁密的分布与单个线圈的长度、两个线圈之间的距离以及极板的结构有密切关系，也与每个线圈的电流大小和气隙分布紧密相关，在本小节进行了详细的阐述。控制器对线圈串接方式的不同直接影响四个线圈电流的分布，继而影响气隙磁力的分布和大小以及气隙的分布，从而体现出悬浮模块不同的调整状态。

4 悬浮模块动态调整对比分析

轨道接缝处的纵向错位是磁浮列车运行过程中受到的常见激励。为探究受到激励时两种连接模式下悬浮模块的动态调整过程，用 Simpack 对单节车进行动力学仿真，比较两种连接模式下悬浮模块动态行为及相应的控制系统参数变化。单节车动力学模型如图 6 所示，一节车包含一个车体，五个悬浮架，十个悬浮模块，十套抗侧滚梁，四十个线圈。车体与悬浮架之间用力元模拟空簧，悬浮模块之间用力元模拟抗侧滚梁，每个悬浮模块与轨道之间有四个控制子结构模拟四个电磁铁线圈，具体参数设置如表 3 所示。

图 6 动力学模型

表 3 动力学模型主要参数表

参数	数值	参数	数值	参数	数值
车体长/m	15	纵梁长/m	2.8	额定气隙/mm	8
车体高/m	2.5	纵梁宽/m	0.4	额定电流/A	30
车体宽/m	2.8	纵梁高/m	0.3	轨道垂向错位/mm	2
车体质量/t	23	单个悬浮架及吊装重量/t	2	运行速度/(m/s)	40
(AW2 工况)		悬浮模块横向距离/m	1.86	传感器距离/m	2.5
空簧距离/m	2.52				

4.1 悬浮模块垂向位移与转动调整过程分析对比

轨道垂向错位+2 mm，即下沉 2 mm，因此垂向位移(点画线)在整个调整过程中是逐步升高，以适应下一段轨道的水平位置，保证悬浮间隙为 8 mm；极板在垂向位移逐渐升高的过程中还伴随着转动(实线)，转角逆时针方向为正，顺时针方向为负，由图 7 可知，转角时而为正时而负，在经历激励截面时悬浮模块负转角最大值在两种连接模式下均远大于正转角最大值。在前端传感器远离激励截面 12 m 之后，两种连接模式的垂向位移与转角经过动态振荡趋于平衡。

图 7 垂向位移与转角波动

4.1.1 极端位置阐述

如图 7a、7b 中两条垂直的虚线, 前端传感器与激励截面相对位置为 0 时为第一位置, 相对位置为 2.37 m 时为第二位置, 在此两处分别为前端控制器和后端控制器中控制电流变化最大的位置(图 8), 是悬浮模块在通过激励过程中两个极端位置, 极板一端离轨道距离达到极值。

两个位置中离轨道最近的那端与轨道之间的距离如表 4 所示, 位置一, 极板逆时针旋转, 危险端为前端, 一、二位模式中, 极板前端与轨道的距离为 5.37 mm; 一、三位模式中极板前端与轨道的距离为 5.44 mm。位置二, 极板顺时针旋转, 危险端为后端, 一、二位模式中, 极板垂向位移合位移为向上 0.49 mm, 此时危险端与轨道的距离为 7.51 mm;

图 8 控制器电流随极板运动状态变化图

一、三位连接时, 极板垂向位移合位移为向上 0.25 mm, 后端与轨道的距离为 7.75 mm。所以一、三位模式在第一个极端位置时危险端垂向位移是一、二位模式的 88.89%; 第二个极端位置时一、三位模式危险端的垂向位移是一、二位连接模式的 51.02%。不管是位置一还是位置二, 一、三位模式下的极板危险端垂向位移都比一、二位连接时更小, 离轨道更远, 更安全。

表 4 极端位置危险端与轨道垂向距离

	位置一			
	垂向/mm	转动/mm	垂向合位移/mm	危险端离轨道垂向距离/mm
C12	↑0.34	↑0.29	↑0.63	5.37
C13	↑0.33	↑0.23	↑0.55	5.44
	位置二			
	垂向/mm	转动/mm	垂向合位移/mm	危险端离轨道垂向距离/mm
C12	↓1.07	↑1.56	↑0.49	7.51
C13	↓1.19	↑1.44	↑0.25	7.75

4.1.2 极端位置吸力与力矩

用气隙磁密表示悬浮模块垂直方向合力和转矩方程为

$$m\ddot{z} = -\sum_{i=1}^n \frac{B_i^2 S_i}{2\mu_0} + G \quad (11)$$

$$F_{\text{levitation}} = \sum_{i=1}^n \frac{B_i^2 S_i}{2\mu_0} \quad (12)$$

$$J\ddot{\theta} = -\sum_{j=1}^m \frac{B_j^2 S_j l_j}{2\mu_0} + \sum_{j=m+1}^n \frac{B_j^2 S_j l_j}{2\mu_0} \quad (13)$$

电流、气隙磁密、垂向力、合转矩以及极板位置几个因素相互交融、互相影响, 用上述公式以及电磁分析所得磁密值, 计算两种连接模式在两个极端位置下的吸力与合转矩。计算值如表 5 所示, 结果表明, 不管悬浮模块有无偏心, 偏心多少, 一、二位连接与

一、三位连接的转矩之差几乎是恒定的,且总是与当前位置所需转矩的方向相同,所以一、三位连接要达到一、二位连接相同的转矩,在保证吸力要求的同时需增大前后端控制器的电流差值,以调整气隙磁密的分布来调整合转矩的方向和大小。

表 5 两种连接模式力矩与吸力计算值

偏心/m		转矩/(N·m)					垂向 吸力/N
		-0.2	-0.1	无	0.1	0.2	
工况 1	C12	-5 157	-1 550	2 057	5 664	9 270	36 068
	C13	-7 216	-3 597	22	3 641	7 261	36 193
工况 2	C12	-8 913	-4 978	-1 042	2 893	6 828	39 352
	C13	-6 503	-2 539	1 424	5 388	9 352	39 637

4.2 线圈电流调整过程对比

每个线圈中电流的调整总是实时地根据其对应的悬浮传感器所处的位置来做出反应。四个线圈中的电流在两种模式调整过程中的对比如图 9 所示,可以看出第一位和第四线圈中的电流在两种连接模式中变化并不大;第二位线圈在一、三位连接模式中电流调整的波峰要滞后一、二位连接模式,因为此时其与后端控制器相连;第三位线圈在一、三位连接模式中电流调整的波峰要超前一、二位连接模式,因为此时其与前端控制器相连。

(a) 第一位线圈

(b) 第二位线圈

(c) 第三位线圈

(d) 第四位线圈

图 9 两种连接模式下各位线圈控制电流变化对比

从图 9 可以看出,一、三位连接模式各线圈中的电流波动幅度均稍大于一、二位控制,意味着要调整同一工况,一、三位连接模式所需的最大电流比一、二位控制更大,最小电流比一、二位连接更小。一、三位连接模式前端控制器所需的最大电流值是一、二位连接的 104.26%,最小电流值是一、二位连接的 86.62%;后端控制器所需的最大电流值是一、二位连接的 106.27%,最小电流值是一、二位连接的 89.08%。

单个线圈发热是看一段时间的平均电流,悬浮模块整个调整过程约 0.3 s,一、二位连接模式前端控制器的平均电流为 29.70 A,后端控制器的平均电流为 29.52 A;一、三位连接模式前端控制器的平均电流为 29.45 A,后端控制器的平均电流为 29.16 A。一、二位模式前端控制器平均电流比一、三位模式大 0.25 A,后端控制器平均电流比一、三位模式大 0.36 A,所以一、二位连接模式线圈的发热应更严重。从控制过程调整电流的大小来看,一、三位连接模式要优于一、二位连接模式。

动力学仿真对悬浮模块通过轨道垂向激励时的运动过程进行了模拟,通过分析运动过程得到两种控制模式下的极端位置,由于模块在最危险的位置

势必会导致控制器以最大的电流幅度变化以对其位置进行调整,因此极端位置均发生在两端控制器电流变化最大时对应的位置节点。两种控制模式下前后端控制器控制对应线圈位置的不同导致气隙磁场分布的不同,应对相同的激励时,呈现出不同的线圈控制电流分布、不同的垂向合力、不同的转矩、不同的模块垂向位移和转动角度,表现出不同的控制效果。极端位置的状态直接影响列车的安全性和悬浮模块的稳定性,两种控制模式下极端位置垂向位移及转角对比结果表明一、三位模式更为安全。既有悬浮电磁铁中,极板中的线圈发热通常较为严重,通过对比应对同一激励时两种控制模式下前后端控制器的电流平均值(即线圈中的电流值),一、三位控制模式在整个控制调整过程中可有效降低线圈中的平均电流,即减轻线圈发热问题。

5 结论

(1) 提出一种新型线圈串接方式,新的连接方式中单个悬浮控制器对应的控制线圈的位置发生改变,通过影响单个悬浮控制箱反映在极板上的纵向气隙磁密分布来影响悬浮模块的调整状态,从而表现出不同的悬浮性能。

(2) 一、三位线圈串连方式在经历轨道垂向激励时,整个调整过程极板离轨道的最近距离大于一、二位方式,单个控制器电流的平均值小于一、二位,所以从安全和线圈发热方面考虑,一、三位方式优于一、二位。

(3) 一、二位方式中单个控制点的磁密分布较为集中,一个电磁铁的单元失效后,电磁铁的另一个点难以支撑导致整个电磁铁悬浮失败;若采用一、三位方式,单个控制点的磁密分布较为分散,在一个点失效后更有可能短暂支撑车辆返回库内检修,对实际工程应用有指导意义。

参 考 文 献

- [1] LEE H W, KIM K C, JU L. Review of maglev train technologies[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(7): 1917-1925.
- [2] CUI P, LI J, ZHANG K, et al. Design of the suspension controller based on compensating feedback linearization[C]// 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Changsha City, China: IEEE, 2010: 1056-1059.
- [3] LIU D S, LI J, ZHANG K. The design of the nonlinear suspension controller for EMS maglev train based on

- feedback linearization[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2005, 27(2): 96-101.
- [4] LI J H, LI J. A practical nonlinear controller for levitation system with magnetic flux feedback[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(7): 1729-1739.
- [5] 鲍佳, 张昆仑. 单磁铁电磁悬浮系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2003, 11(11): 863-865.
BAO Jia, ZHANG Kunlun. Research of electromagnetic suspension system of single magnetic[J]. Computer Measurement and Control, 2003, 11(11): 863-865.
- [6] 黎松奇, 张昆仑. 单磁铁悬浮系统自激振动的稳定性分析及抑制[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(3): 410-416.
LI Songqi, ZHANG Kunlun. Self-excited vibration of single-magnet suspension system: stability analysis and inhibition[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(3): 410-416.
- [7] 龙志强, 薛松, 陈慧星. 基于 LMI 的磁浮列车悬浮系统被动容错控制[J]. 计算机仿真, 2008, 25(2): 265-268.
LONG Zhiqiang, XUE Song, CHEN Huixing. Passive fault tolerant control for suspension system of maglev train based on LMI[J]. Computer Simulation, 2008, 25(2): 265-268.
- [8] YANG J, ZOLOTAS A, CHEN W H, et al. Robust control of nonlinear MAGLEV suspension system with mismatched uncertainties via DOBC approach[J]. ISA Transactions, 2011, 50(3): 389-396.
- [9] LIU H K, CHANG W. Double-loop control of maglev train[J]. Control Engineering of China, 2007, 14(2): 198-200.
- [10] 刘国清, 张昆仑, 陈殷. HSST 型磁浮列车悬浮电磁铁的优化设计[J]. 微特电机, 2013(3): 33-35, 39.
LIU Guoqing, ZHANG Kunlun, CHEN Yin. Optimal design of electromagnet in HSST vehicle's levitation system[J]. Small & Special Electrical Machines, 2013(3): 33-35, 39.
- [11] 刘少克, 倪鸿雁, 张葵葵. 基于数值分析的磁浮列车悬浮电磁铁电磁场分布研究[J]. 铁道学报, 2007(6): 40-43.
LIU Shaoke, NI Hongyan, ZHANG Kuikui. Research for electromagnetic field of suspension electromagnet of maglev train based on numerical analysis[J]. Journal of the China Railway Society, 2007(6): 40-43.
- [12] 刘慧敏, 尹力明. 磁悬浮列车悬浮电磁铁电磁场的有限元分析[J]. 机车电传动, 2004(6): 32-34.
LIU Huimin, YIN Liming. Finite element analysis on electromagnetic field of levitation magnet of maglev train[J]. Electric Drive for Locomotives, 2004(6): 32-34.
- [13] LIU S, GUO Z, CHEN G. 3D Electromagnetic field analysis for mixing suspension electromagnet used by maglev train[C]//2010 International Conference on

- Electrical and Control Engineering(ICECE). Wuhan, China: IEEE, 2010: 5-7.
- [14] CHEN G R, ZHENG L L, ZHOU D F. Study on the characteristics of the maglev electromagnet considering the magnetic field induced by eddy current[J]. Applied Mechanics and Materials. 2013, 392: 413-419.
- [15] DING J F, LONG Z Q, YANG X. Numerical analysis of eddy current effect of EMS system for medium-low speed maglev train[C]//2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE). Shanghai, PEOPLESR CHINA: IEEE, 2017: 301-305.
- [16] 郑丽莉, 李杰, 李金辉. 钢轨涡流对磁浮列车悬浮电磁力影响的研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(8): 328-331, 336.
- ZHENG Lili, LI Jie, LI Jinhui. Research on influence of eddy current induced in steel rails on levitation force of maglev[J]. Computer Simulation, 2011, 28(8): 328-331, 336.
- [17] ZHANG M, LUO S H, GAO C, et al. Research on the mechanism of a newly developed levitation frame with mid-set air spring[J]. Vehicle System Dynamics, 2018: 1-21.
- [18] WANG K R, LUO S H, MA W H, et al. Dynamic characteristics analysis for a new-type maglev vehicle[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(12): 1-10.
-
- 作者简介: 张敏, 女, 1987 年出生, 博士研究生。主要研究方向为磁浮列车。
E-mail: zhmlzhm@126.com
- 马卫华(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 副研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为磁浮列车悬浮架设计及车辆动力学。
E-mail: mwh@swjtu.edu.cn