

超导电动磁浮列车悬浮和导向特性

王小农^{1,2}, 黄靖宇^{1,2}

(1. 同济大学 国家磁浮交通工程技术研究中心, 上海 201804; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 以超导电动磁浮列车为研究对象, 建立了单个转向架与悬浮和导向线圈的场-路-运动耦合数值模型, 然后对该模型进行求解并验证了其正确性。基于该模型, 分析了不同垂向位移和横向位移下单个转向架所受的悬浮力与导向力, 并揭示了无交叉连接和交叉连接“8”字形线圈之间的关系。结果表明: 无交叉连接“8”字形线圈产生的作用力主要为悬浮力, 交叉连接“8”字形线圈产生的作用力主要为导向力; 随着横向位移的增大, 导阻比先增大后减小; 随着垂向位移的增大, 浮阻比先增大后减小。

关键词: 超导电动磁浮列车; “8”字形线圈; 悬浮特性; 导向特性

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Levitation and Guidance Characteristics of Superconducting Electrodynamic Maglev Train

WANG Xiaonong^{1,2}, HUANG Jingyu^{1,2}

(1. National Maglev Transportation Engineering R&D Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Taking the superconducting electrodynamic maglev train as the research object, a field-circuit-motion coupling numerical model of a bogie and levitation/guidance coil was established. Then, the model was solved and its correctness was verified. Finally, the levitation force and guidance force of a bogie under different vertical displacements and lateral displacements were analyzed and the relationship between non-cross connection and cross-connection figure-eight-shaped coils was revealed based on the model. The results show that the force generated by no-cross connection figure-eight-shaped coils is mainly the levitation force, and the force generated by cross connection figure-eight-shaped coils is

mainly the guidance force. With the increase of lateral displacement, the guidance-drag ratio increases first and then decreases. With the increase of vertical displacement, the levitation-drag ratio also increases first and then decreases.

Key words: superconducting electrodynamic maglev train; figure-eight-shaped coils; levitation characteristics; guidance characteristics

在新型轨道交通发展多样化的进程中, 高速磁浮列车以转弯半径小、爬坡能力强、对环境友好等特点, 成为最具竞争力的地面交通运输工具之一^[1-6]。相对成熟的列车磁浮技术包括电磁悬浮 (electromagnetic suspension, EMS) 和电动悬浮 (electrodynamic suspension, EDS)。EMS 磁浮列车悬浮间隙较小 (8~10 mm), 其悬浮和导向系统采用主动控制^[7-8]。超导电动磁浮列车作为 EDS 磁浮技术的一种, 悬浮间隙较大 (约 100 mm), 悬浮和导向系统采用被动控制。超导线圈无铁心、质量轻、磁场强、能耗低, 并具备悬浮、导向、驱动的作用^[9], 因此就超导电动磁浮列车相关技术展开分析。

日本山梨磁浮试验线以 ML 型电动磁浮列车为试验样车, 通过安装在轨道上及车辆两侧的长定子直线电机驱动, 车载超导线圈起励磁作用, 轨道内侧线圈起电枢作用。悬浮力与导向力来自于车辆两侧, 在轨道两侧的侧壁上排列着多组悬浮和导向绕组, 车辆的超导磁场在轨道侧壁的短路绕组中产生感应电流和感应磁场, 维持车体运行过程中的稳定悬浮和导向。ML 型电动磁浮系统轨道结构的悬浮与导向绕组为“8”字形零磁通线圈, 确保了不受牵引绕组的影响。轨道产生的悬浮和导向磁场为感应磁场, 列车运行速度越高, 悬浮力与导向力越大, 当列车速度低于悬浮和导向临界

收稿日期: 2021-10-21

第一作者: 王小农 (1993—), 男, 博士生, 主要研究方向为高速磁浮列车稳定性控制。

E-mail: xiaonongwang_work@163.com

通信作者: 黄靖宇 (1967—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为高速磁浮交通系统理论和应用。

E-mail: huangjingyu@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

速度时,超导磁浮车辆所产生的悬浮力和导向力较小,不足以支撑列车悬浮和导向,车辆依靠安装在转向架上的支撑车轮和导向车轮辅助运行。因此,开展超导电动磁浮列车的悬浮和导向特性研究,揭示超导线圈与轨道线圈之间的作用力关系,对于超导电动磁浮列车的稳定控制以及电动磁浮系统的结构设计和优化具有重要意义。

王志涛等^[10]以日本 MLX01 型超导电动磁浮列车为研究对象,仅考虑了超导线圈与单个轨道线圈正对的情况,研究了电磁力随横向位移、悬浮位移的变化规律以及轨道线圈感应电流的形成机理。Cai 等^[11]探讨了 MLX01 型超导电动磁浮列车运行过程中影响系统稳定性的关键参数,并计算和分析了列车发生竖向位移和侧向位移时列车的相关特性,所建立的模型也仅考虑了转向架单侧的作用,未建立完整的磁浮列车转向架结构模型。电动磁浮列车利用电磁力实现推进、悬浮和导向,目前计算电磁力的常用方法是电磁场方法和电路方法,但大多数磁场计算有限元软件无法实现与运动相关的计算问题^[5],因此大多数学者选择电路元件来表示实际系统中的元件及其相对运动,以电路的方式模拟电磁系统或机电系统的瞬态和动态性能^[12]。Say^[13]采用电路理论分析了旋转电机的瞬态响应和稳态性能, Elliott^[14]采用动态电路理论分析了电磁发射装置的瞬态和动态性能。加拿大磁悬浮研究团队采用动态电路理论计算了连续薄板的悬浮性能,并且将动态电路理论与谐波分析相结合,确定了连续薄板的瞬态及稳态性能^[15-16]。因此,结合动态电路理论和磁场理论,建立超导电动磁浮列车单个转向架的场-路-运动耦合模型,开展 MLX01 型超导电动磁浮列车相关电磁关系及作用力关系的研究。

以 MLX01 型超导电动磁浮列车为研究对象,分析超导线圈与轨道线圈组成系统的电路一般表达式,并建立单个转向架与轨道线圈的场-路-运动耦合数值模型。随后,分析不同垂向位移和横向位移下超导线圈与轨道线圈之间作用力的关系特性,揭示无交叉连接与交叉连接“8”字形轨道线圈之间的关系,并研究列车运行过程中浮阻比与导阻比变化特性。

1 悬浮和导向系统一般电路数值模型

根据 MLX01 型超导电动磁浮列车地面轨道“8”字形零磁通线圈(下文简称“8”字形线圈)与超导线圈的

位置结构关系,超导线圈与“8”字形线圈系统中的电流矩阵、电压矩阵、电感矩阵、电阻矩阵分别如下所示:

$$I = \begin{bmatrix} I_v \\ I_g \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$E = \begin{bmatrix} E_v \\ E_g \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_v & L_{vg} \\ L_{gv} & L_g \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_v & 0 \\ 0 & R_g \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: I_v 、 E_v 分别为超导线圈的电流和电压子矩阵; I_g 、 E_g 分别为“8”字形线圈的电流和电压子矩阵; L_v 、 L_g 分别为超导线圈和“8”字形线圈的电感子矩阵; L_{vg} 和 L_{gv} 分别为超导线圈和“8”字形线圈的互感子矩阵; R_v 、 R_g 分别为超导线圈和“8”字形线圈的电阻子矩阵。鉴于超导线圈的特性,式(4)中的 R_v 为零元素矩阵。定义变换矩阵,如下所示:

$$T = \begin{bmatrix} T_v & 0 \\ 0 & T_g \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: T_v 、 T_g 分别为超导线圈和“8”字形线圈电流和电压的变换子矩阵,其结构形式取决于线圈之间的连接方式。若仅“8”字形线圈的连接方式发生变化而超导线圈的结构不发生变化,则 T_v 为单位对角阵。

基于能量守恒定律,变换后系统的电流、电压表达式以及变换后系统的电感矩阵、电感变化率矩阵和电阻矩阵表达式分别如下所示:

$$I' = TI \quad (6)$$

$$E' = T^T E \quad (7)$$

$$L' = T^T L T \quad (8)$$

$$G' = T^T G T \quad (9)$$

$$R' = T^T R T \quad (10)$$

式中: I 和 I' 分别为系统变换前后的电流矩阵; E 和 E' 分别为系统变换前后的电压矩阵; L 和 L' 分别为系统变换前后的电感矩阵; G 和 G' 分别为系统变换前后的电感变化率矩阵; R 和 R' 分别为系统变换前后的电阻矩阵。基于超导电动磁浮列车系统电路相关参数表达式,假设在超导电动磁浮车辆一侧由 m 个超导磁体(SCM)与 n 个“8”字形线圈相互作用而产生悬浮力和导向力,其中 n 个“8”字形线圈包括 $2n$ 个线圈,上部线圈从1到 n 编号,下部线圈从 $n+1$ 到 $2n$ 编号。超导电动磁浮列车单个转向架与“8”字形线圈结构如图1所示。

根据基尔霍夫电压定律,超导高速磁浮系统的电压方程如下所示:

$$E = RI + \frac{d}{dt}L I \quad (11)$$

I 和 E 为 $(m+n)$ 阶列矩阵, L 为 $(m+n) \times (m+n)$ 阶方阵, R 为 $(m+n)$ 阶对角阵。

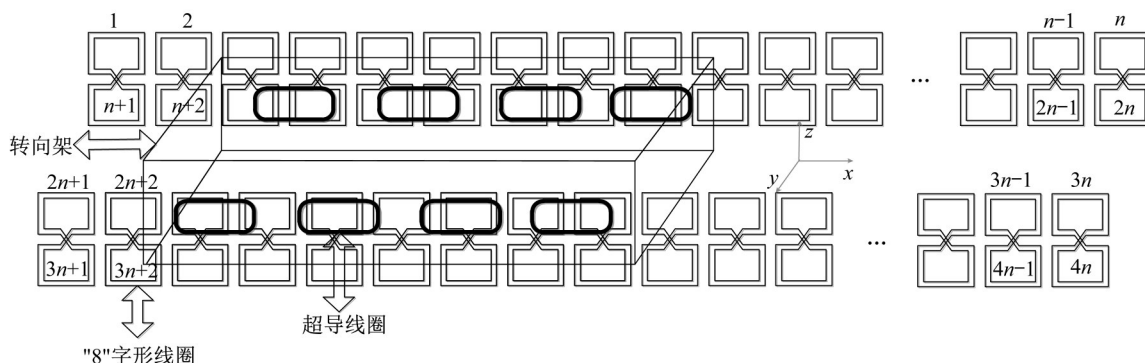


图1 超导电动磁浮列车单个转向架与“8”字形线圈

Fig.1 Single bogie and figure-eight-shaped coil of superconducting electrodynamic maglev train

超导电动磁浮列车运行过程为三维运动,采用 v_x, v_y, v_z 分别表示车辆在 x, y, z 方向上的运行速度, 将式(11)转化为以下形式的动态电压方程:

$$\begin{cases} E = RI + v_x G_x I + v_y G_y I + v_z G_z I + L \frac{d}{dt} I \\ G_x = \frac{\partial L}{\partial x} \\ G_y = \frac{\partial L}{\partial y} \\ G_z = \frac{\partial L}{\partial z} \end{cases} \quad (12)$$

根据能量法,超导磁浮系统中作用在车辆上的3个力分量 f_x, f_y 及 f_z 表达式如下所示:

$$f_x = \frac{1}{2} I^T G_x I \quad (13)$$

$$f_y = \frac{1}{2} I^T G_y I \quad (14)$$

$$f_z = \frac{1}{2} I^T G_z I \quad (15)$$

式中: f_x 为超导磁浮系统运行方向产生的推进力; f_y 为超导磁浮系统水平方向的导向力; f_z 为超导磁浮系统垂直方向的悬浮力。

2 超导电动磁浮列车动态电路模型

2.1 无交叉连接“8”字形线圈电路模型

无交叉连接“8”字形线圈与超导线圈结构模型如图2a所示,电路简化模型如图2b所示。

每个分支具有电阻 R 和电感 L ,代表8”字形线圈的单个环路。上下回路之间的互感为 M ,移动超

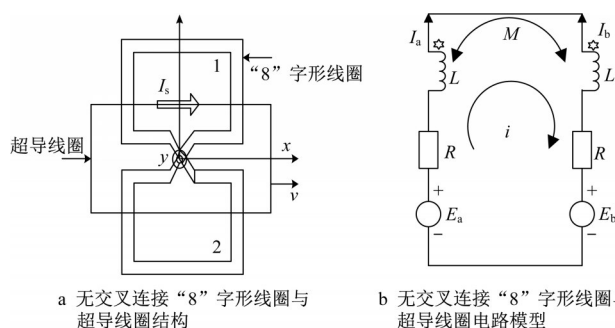


图2 无交叉连接“8”字形线圈与超导线圈结构和电路模型
Fig.2 Structure and circuit model of non-cross connection figure-eight-shaped coil and superconducting coil

导磁体和“8”字形线圈的上下回路之间的耦合分别由电压 E_a 和 E_b 表示。 E_a, E_b 的表达式以及系统电压方程如下所示:

$$E_a = -I_s v \frac{\partial M_{sa}}{\partial x} \quad (16)$$

$$E_b = -I_s v \frac{\partial M_{sb}}{\partial x} \quad (17)$$

$$2Ri + 2(L - M) \frac{di}{dt} = E_a - E_b \quad (18)$$

因此,由式(13)、(14)、(15)可得超导线圈所受电磁力 f_x, f_y 及 f_z 的表达式,如下所示:

$$f_x = I_s I_a \frac{\partial M_{sa}}{\partial x} + I_s I_b \frac{\partial M_{sb}}{\partial x} = I_s i \left(\frac{\partial M_{sa}}{\partial x} - \frac{\partial M_{sb}}{\partial x} \right) \quad (19)$$

$$f_y = I_s I_a \frac{\partial M_{sa}}{\partial y} + I_s I_b \frac{\partial M_{sb}}{\partial y} = I_s i \left(\frac{\partial M_{sa}}{\partial y} - \frac{\partial M_{sb}}{\partial y} \right) \quad (20)$$

$$f_z = I_s I_a \frac{\partial M_{sa}}{\partial z} + I_s I_b \frac{\partial M_{sb}}{\partial z} = I_s i \left(\frac{\partial M_{sa}}{\partial z} - \frac{\partial M_{sb}}{\partial z} \right) \quad (21)$$

式(16)–(21)中: I_s 和 v 分别为超导线圈的电流和速度; M_{sa} 和 M_{sb} 分别为超导线圈与“8”字形线圈上下回路之间的互感; i 为“8”字形线圈中循环的电流; I_a 和 I_b 分别为在上下环路中流动的电流。

2.2 交叉连接“8”字形线圈电路模型

超导线圈与安装在导轨两侧的交叉连接“8”字形线圈结构模型如图 3a 所示, 电路模型如图 3b 所示。回路 1 和 2 之间的互感与回路 3 和 4 之间的互感均为 M 。 I_j ($j = a, b, c, d$) 和 E_j ($j = a, b, c, d$) 分别为

环路中的流动电流和感应电压, 电路中流动的网状电流分别为 i_1 、 i_2 和 i_3 , 其中 i_2 为穿过导轨的交叉连接电缆中的电流, 实现超导磁浮系统导向功能。回路 3 和 4 中的感应电压分别为 E_c 和 E_d , 超导线圈与回路 3 和 4 之间的互感分别为 M_{sc} 和 M_{sd} 表示, 关系式如下所示:

$$E_c = -I_s v \frac{\partial M_{sc}}{\partial x} \quad (22)$$

$$E_d = -I_s v \frac{\partial M_{sd}}{\partial x} \quad (23)$$

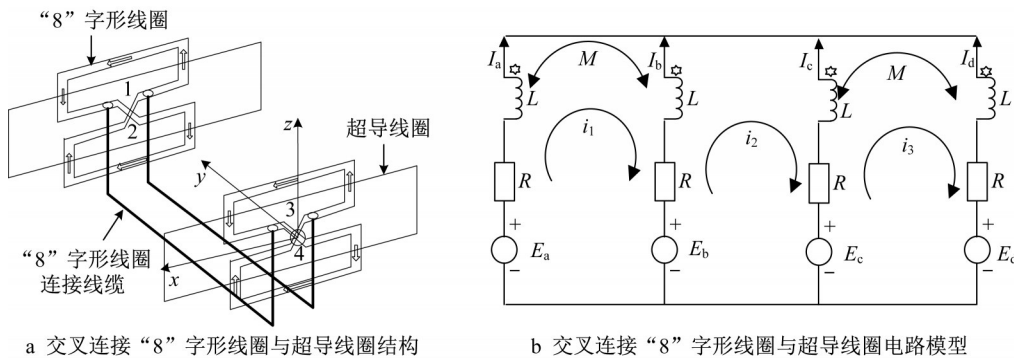


图 3 交叉连接“8”字形线圈与超导线圈结构和电路模型

Fig.3 Structure and circuit model of cross connection figure-eight-shaped coil and superconducting coil

根据基尔霍夫电压定律, 如图 3b 所示网格电压方程如下所示:

$$2Ri_1 + 2(L - M) \frac{di_1}{dt} - Ri_2 - (L - M) \frac{di_2}{dt} = E_a - E_b \quad (24)$$

$$-Ri_1 - (L - M) \frac{di_1}{dt} + 2Ri_2 + 2L \frac{di_2}{dt} - Ri_3 - (L - M) \frac{di_3}{dt} = E_b - E_c \quad (25)$$

$$-Ri_2 - (L - M) \frac{di_2}{dt} + 2Ri_3 + 2(L - M) \frac{di_3}{dt} = E_c - E_d \quad (26)$$

求解方程(24)–(26), 超导电动磁浮列车运行过程中超导线圈所受电磁力的 3 个分量表达式如下所示:

$$f_x = I_s \left(i_1 \left(\frac{\partial M_{sa}}{\partial x} - \frac{\partial M_{sb}}{\partial x} \right) + i_2 \left(\frac{\partial M_{sb}}{\partial x} - \frac{\partial M_{sc}}{\partial x} \right) + i_3 \left(\frac{\partial M_{sc}}{\partial x} - \frac{\partial M_{sd}}{\partial x} \right) \right) \quad (27)$$

$$f_y = I_s \left(i_1 \left(\frac{\partial M_{sa}}{\partial y_1} - \frac{\partial M_{sb}}{\partial y_1} \right) + i_2 \left(\frac{\partial M_{sb}}{\partial y_1} - \frac{\partial M_{sc}}{\partial y_2} \right) + i_3 \left(\frac{\partial M_{sc}}{\partial y_2} - \frac{\partial M_{sd}}{\partial y_2} \right) \right) \quad (28)$$

$$f_z = I_s \left(i_1 \left(\frac{\partial M_{sa}}{\partial z} - \frac{\partial M_{sb}}{\partial z} \right) + i_2 \left(\frac{\partial M_{sb}}{\partial z} - \frac{\partial M_{sc}}{\partial z} \right) + i_3 \left(\frac{\partial M_{sc}}{\partial z} - \frac{\partial M_{sd}}{\partial z} \right) \right) \quad (29)$$

式中: y_1 与 y_2 分别为超导电动磁浮列车运行时超导线圈两侧与轨道侧壁之间的横向位移。由式(27)–(29)可知, 交叉连接“8”字形线圈悬浮和导向结构的电磁力分量取决于“8”字形线圈之间流动的电流。当超导电动磁浮列车处于轨道中心位置时, 交叉连接“8”字形线圈的悬浮和导向系统成为 2 个无交叉连接“8”字形线圈, 并且列车运行过程中所受到的电磁力由两部分组成, 一部分是由交叉连接“8”字形线圈产生的, 另一部分是由单个“8”字形线圈和气隙差异形成的。

3 超导电动磁浮列车悬浮和导向特性分析

以 MLX01 型超导电动磁浮列车为例进行悬浮和导向特性分析, 相关参数如表 1 所示^[10]。由第 2 节知, 悬浮和导向系统结构各方向所受的电磁力与超

导线圈和“8”字形线圈各环之间的互感及其不同方向的互感变化率有关,因此根据聂以曼公式计算超导线圈与“8”字形线圈之间的互感^[17]。结合无交叉连接“8”字形线圈电路模型和交叉连接“8”字形线圈电路模型,建立单个转向架的场-路-运动耦合数值模型,并采用 Matlab 编写该模型仿真程序。

表 1 MLX01 型超导电动磁浮列车参数

Tab.1 Parameters of superconducting electrodynamic maglev train of MLX01 type

线圈	参数	数值
超导线圈	长/cm	107
	高/cm	50
	电流/A	250
	匝数	2 800
	极距/cm	135
“8”字形线圈	长/cm	35
	高/cm	34
	匝数	24
	上下环路间距/cm	42
	电阻/mΩ	3.61
	电感/mH	0.253
	上下环路互感/μH	18.2
距超导线圈的距离/cm	18.5	

3.1 单个转向架的场-路-运动耦合模型及数值验证

MLX01 型超导电动磁浮列车悬浮和导向系统受力分析如图 4 所示,其中 f_{pq} ($p=x, y, z, q=R, L$) 表示不同方向左右两侧的受力。文献[18]中对日本山梨磁浮试验线“8”字形线圈无交叉连接时转向架单侧的悬浮力和导向力进行了现场测量试验,因此本研究中采用现场实测数据验证单个转向架场-路-运动耦合数值模型的正确性。采用单个转向架的场-路-运动耦合数值模型,对不同时速下的垂向力、纵向力以及侧向力进行计算,并将速度为 150、200、250、300 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 下的垂向力、纵向力以及侧向力与山梨试验线实测数据进行对比,如图 5~7 所示。可以看出,在忽略现场实测数据和单个转向架数值模型误差的基础上,本模型计算值与山梨试验线实测值基本吻合,验证了本模型的正确性。

3.2 超导电动磁浮列车悬浮和导向特性分析

MLX01 型超导电动磁浮列车处于轨道中心时,单侧超导线圈与“8”字形线圈之间的横向位移为 18.5 cm。超导线圈与“8”字形线圈之间的位置关系以及垂向位移和横向位移定义如图 8 所示。假设左侧横向位移为 13.5 cm,右侧横向位移为 23.5 cm,转向架的垂向位移变化范围为 0~15 cm,车辆速度为 135 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 9 为转向架左右两侧悬浮力与垂向位移关系。从图 9 可以看出,MLX01 型超导电动磁浮列车运行过程中悬浮力

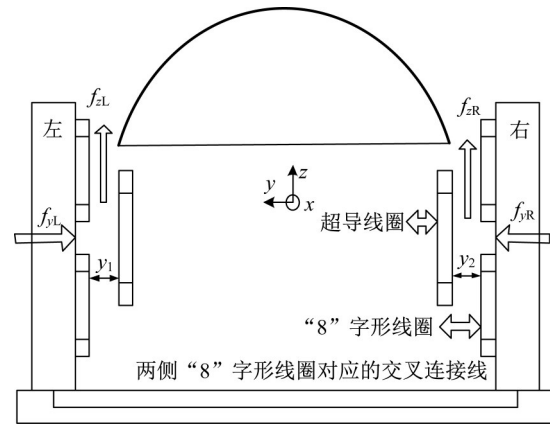


图 4 悬浮和导向系统受力分析

Fig. 4 Force analysis of levitation and guidance system

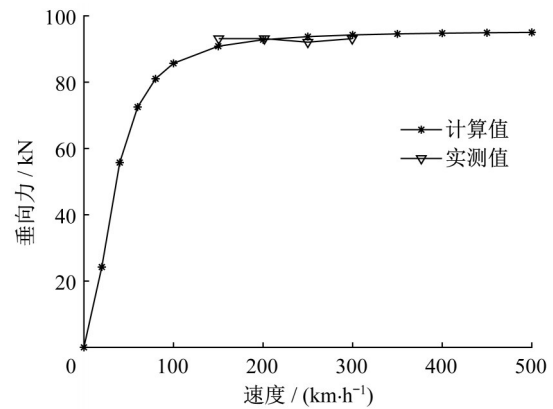


图 5 垂向力计算值与实测值对比

Fig. 5 Comparison between calculated value and measured value of vertical force

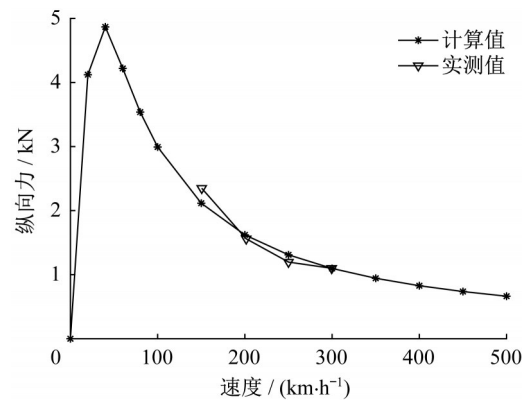


图 6 纵向力计算值与实测值对比

Fig. 6 Comparison between calculated value and measured value of longitudinal force

主要由无交叉连接下左右两侧“8”字形线圈提供,而交叉连接下悬浮力较小。同时,无交叉连接下左侧的悬浮力明显大于右侧的悬浮力,因此超导转向架会发生侧滚现象,影响列车的运行稳定性。图 10 为转向架左右两侧导向力与垂向位移的关系。当垂向位移为零时,

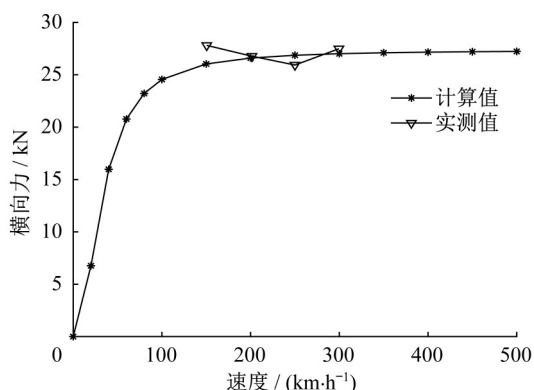


图 7 横向力计算值与实测值对比

Fig. 7 Comparison between calculated value and measured value of transverse force

无交叉连接下左右两侧的导向力均为零。图 11 为交叉连接与无交叉连接下导向力与垂向位移关系。由于两侧初始横向位移不相等, 因此垂向位移为零时交叉连接“8”字形线圈提供导向力, 大小为 50 kN 左右。当垂向位移小于 5 cm 时, 无交叉连接下产生的导向力明显小于交叉连接下产生的导向力, 但垂向位移大于 5 cm 时, 无交叉连接下产生的导向力急剧增大, 并且无交叉连接和交叉连接下在垂向位移为 5 cm 时导向力基本相等。在 MLX01 型超导电动磁浮列车运行过程中, 垂向位移一般为 1~4 cm, 因此车辆正常运行时交叉连接下产生的导向力作为车辆导向的主要作用力。

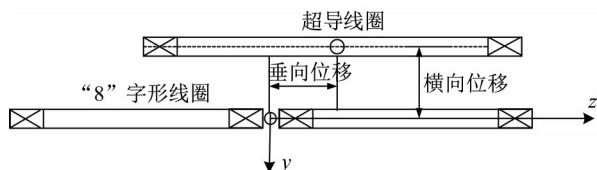


图 8 垂向位移与横向位移定义

Fig. 8 Definition of vertical displacement and lateral displacement

假设左侧横向位移变化范围为 18.5~6.5 cm, 右侧横向位移变化范围为 18.5~30.5 cm, 车辆垂向位移为 5 cm。图 12 为交叉连接与无交叉连接下转向架左右两侧悬浮力与横向位移关系。由图 12 可知, 随着横向位移的变化, 交叉连接下产生的悬浮力基本趋近于零, 车辆运行过程中的悬浮力主要由无交叉连接下产生的悬浮力提供, 因此超导转向架会发生侧滚现象, 影响列车的运行稳定性。图 13 为交叉连接与无交叉连接下转向架左右两侧导向力与横向位移关系。随着横向位移的变化, 无交叉连接下左侧导向力逐步增大, 右侧导向力逐步减小, 交叉连接下左右两侧导向力均增大, 并且左侧导向力增大

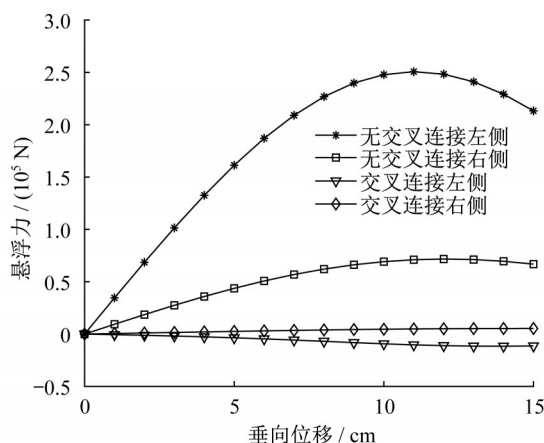


图 9 交叉连接与无交叉连接下转向架左侧和右侧悬浮力与垂向位移关系

Fig. 9 Relationship between levitation force and vertical displacement under cross and non-cross connection on left and right sides of bogie

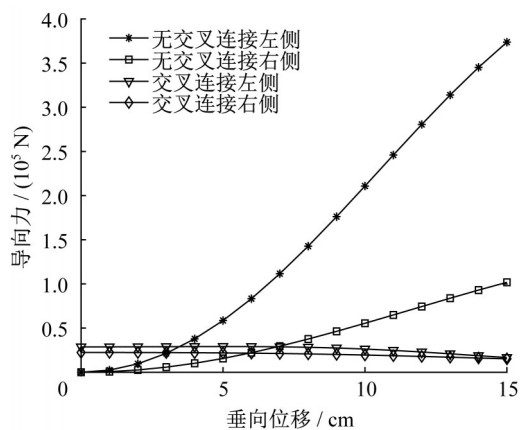


图 10 交叉连接与无交叉连接下转向架左侧和右侧导向力与垂向位移关系

Fig. 10 Relationship between guidance force and vertical displacement under cross and non-cross connection on left and right sides of bogie

速度大于右侧。图 14 为交叉连接与无交叉连接下导向力与横向位移关系。由图 14 可知, 交叉连接下产生的导向力大于无交叉连接下产生的导向力, 并且 2 种情况下导向力与横向位移成正比例关系。

图 15 为当垂向位移 5.0 cm 时不同横向位移下的导阻比和浮阻比变化特性。当横向位移偏移为零时, 浮阻比达到最大值 108.718 6, 并且浮阻比随着横向位移的增大而逐渐减小。当横向位移约为 4.0 cm 时, 导阻比达到最大值 53.63, 并且随着横向位移的增大导阻比呈现先增大后减小的趋势。图 16 为当横向位移 13.5 cm 时不同垂向位移下导阻比和浮

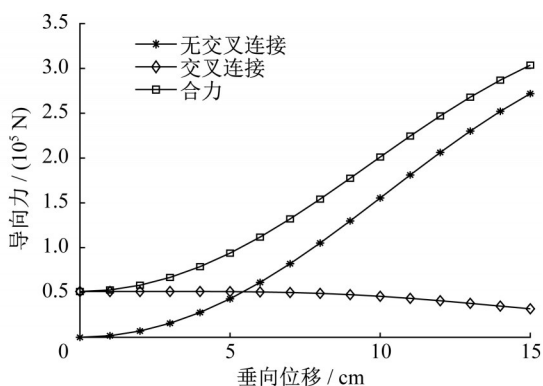


图 11 交叉连接与无交叉连接下导向力与垂向位移关系
Fig.11 Relationship between guidance force and vertical displacement under cross and non-cross connection

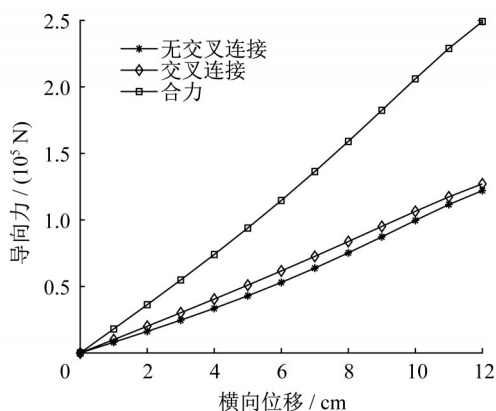


图 14 交叉连接与无交叉连接下导向力与横向位移关系
Fig.14 Relationship between guidance force and lateral displacement under cross and non-cross connection

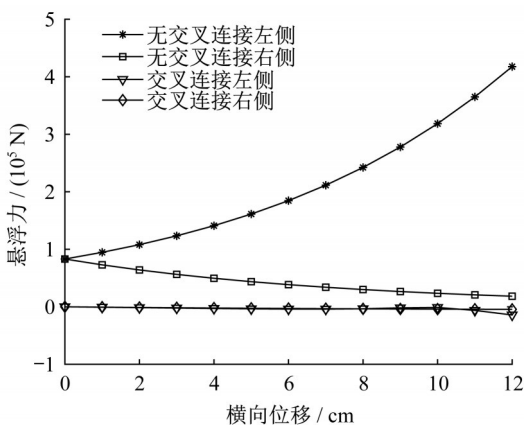


图 12 交叉连接与无交叉连接下转向架左侧和右侧悬浮力与横向位移关系
Fig.12 Relationship between levitation force and lateral displacement under cross and non-cross connection on left and right sides of bogie

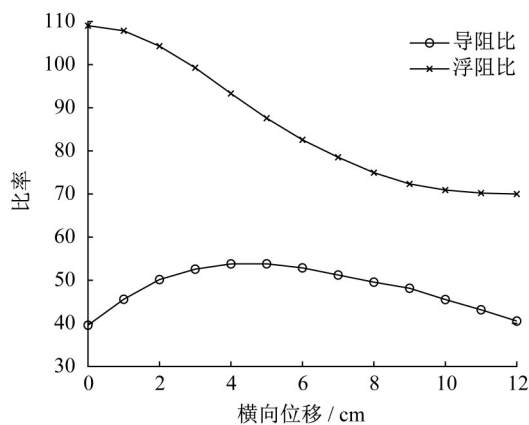


图 15 导阻比和浮阻比与横向位移关系
Fig.15 Relationship between guidance-drag ratio and lateral displacement and between levitation-drag ratio and lateral displacement

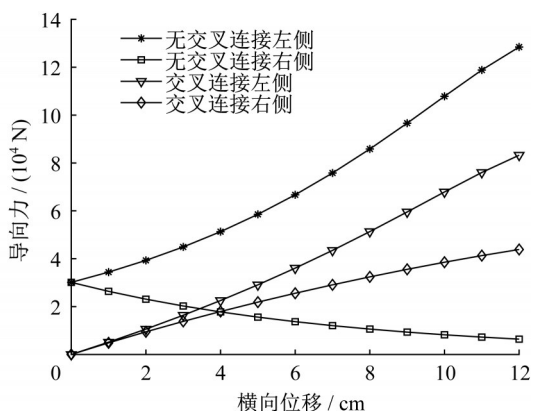


图 13 交叉连接与无交叉连接下转向架左侧和右侧导向力与横向位移关系
Fig.13 Relationship between guidance force and lateral displacement under cross and non-cross connection on left and right sides of bogie

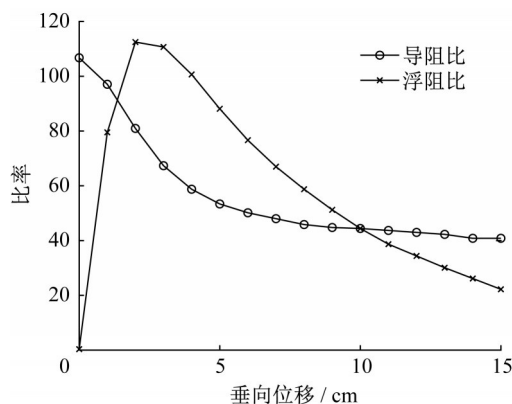


图 16 导阻比和浮阻比与垂向位移关系
Fig.16 Relationship between guidance-drag ratio and vertical displacement and between levitation-drag ratio and vertical displacement

阻比变化特性。垂向位移为零时,浮阻比为零;当垂向位移为 2.0 cm 左右时,浮阻比达到最大值 110.570 0;当垂向位移大于 2.0 cm 时,浮阻比随着垂向位移的增大而减小。同时,导阻比随着垂向位移的增大逐渐呈下降趋势。

4 结论

(1)MLX01型超导电动磁浮列车运行过程中悬浮力主要由无交叉连接下左右两侧“8”字形线圈产生,交叉连接下“8”字形线圈产生的悬浮力较小,并且列车偏离轨道中心时无交叉连接下左右两侧的悬浮力明显不等,因此转向架会发生侧滚现象,影响列车的运行稳定性。

(2)当垂向位移逐渐增大时,无交叉连接下产生的导向力明显小于交叉连接下产生的导向力,但随着垂向位移的增大,无交叉连接下产生的导向力急剧增大。车辆正常运行时垂向位移较小,因此交叉连接下产生的导向力作为车辆导向的主要作用力。

(3)随着横向位移的变化,无交叉连接下横向位移减小的一侧导向力逐步增大,另一侧导向力逐步减小,交叉连接下左右两侧导向力均增大,并且横向位移减小的一侧导向力增大速度大于另一侧。

(4)当横向位移为零时,浮阻比达到最大值,并且浮阻比随着横向位移的增大而逐渐减小,但导阻比随着横向位移的增大呈现先增大后减小的趋势。当垂向位移为零时,浮阻比为零,随着垂向位移的逐渐增大,浮阻比先增大后减小,导阻比随着垂向位移的增大逐渐减小。

作者贡献声明:

王小农:模型构建,程序编写,论文撰写。

黄靖宇:研究方向提出,学术指导,论文指导。

参考文献:

- [1] TANAKA H. Change in the coil distribution of electro-dynamic suspension system [C]//International Symposium on Magnetic Suspension Technology. [S. l.]:NASA, 1991:813-825.
- [2] TAKAO K, TAKAHASHI K. Vehicles for superconducting maglev system on Yamanashi test line [J]. Transactions on the Built Environment, 1994, 7:487.
- [3] LI J. Normal force analysis on a high temperature superconducting linear synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22 (3): 5200304.
- [4] YOSHIOKA H, WATANABE K. Dynamic characteristics of side-wall magnetically levitated vehicle[C]//Proceedings of the

- International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles. Yokohama: [s.n.], 1993:103-108.
- [5] HE J L, ROTE D M, COFFEY H T. Study of Japanese electrodynamic-suspension maglev systems [R]. Lemont: Argonne National Laboratory, 1994.
- [6] 王厚生,杜玉梅,夏平畴,等. 电动式磁悬浮列车金属板轨道结构的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(7):162. WANG Housheng, DU Yumei, XIA Pingchou, *et al.* Research on DMS train metal guideways construction [J] Proceedings of the CSEE, 2005,25(7): 162.
- [7] 闫宇壮,李云钢,程虎. 电动电磁混合磁悬浮稳定性及技术特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 53. YAN Yuzhuang, LI Yungang, CHENG Hu. Analysis of levitation stability and technology characters of EDS and EMS hybrid maglev[J]. Proceeding of the CSEE, 2007,27(6):53.
- [8] 陈殷,张昆仑. 板式双边永磁电动悬浮电磁力计算[J]. 电工技术学报, 2016,31(24):150. CHEN Yin, ZHANG Kunlun. Calculation of electromagnetic force of plate type null double side permanent magnet electrodynamic suspension [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 150.
- [9] CASSAT A, JUFER M. Maglev projects technology aspects and choices [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2002, 12(1):915.
- [10] 王志涛,蔡尧,龚天勇,等. 基于场-路-运动耦合模型的超导电动悬浮列车特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 1162. WANG Zhitao, CAI Yao, GONG Tianyong, *et al.* Study on characteristics of superconducting electric levitation train based on field road motion coupling model [J]. Proceeding of the CSEE, 2019,39(4): 1162.
- [11] CAI Y, MA G, WANG Y, *et al.* Semianalytical calculation of superconducting electrodynamic suspension train using figure-eight-shaped ground coil [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020,30(5):1.
- [12] 万尚军,钱金根,倪光正,等. 电动悬浮型磁悬浮列车悬浮与导向技术剖析[J]. 中国电机工程学报, 2000,20(9):22. WAN Shangjun, QIAN Jingen, NI Guangzheng, *et al.* Study of the levitation and guidance technology for electrodynamic suspension maglev vehicle [J]. Proceeding of the CSEE, 2000, 20(9):22.
- [13] SAY M G. The general theory of electrical machines [J]. Electronics & Power, 2009, 21(4):253.
- [14] ELLIOTT D G. Mesh-matrix analysis method for electromagnetic launchers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25(1):1649.
- [15] OOI B T. A dynamic circuit theory of the repulsive magnetic levitation system [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 2006, 96(4):1094.
- [16] OM PRAKASH J. Further applications of the dynamic circuit theory to the electrodynamic repulsive magnetic levitation systems[D]. Montreal: McGill University, 1978.
- [17] 刘洋,何圣民. 任意空间位置两多边形多匝线圈的互感计算[J]. 价值工程, 2013,32(31):235. LIU Yang, HE Shengmin. The calculation of mutual inductance of two polygons with multiturn coils at arbitrarily position [J]. Value Engineering, 2013,32(31): 235.
- [18] FUJIMOTO T, AIBA M, SUZUKI H, *et al.* Characteristics of electromagnetic force of ground coil for levitation and guidance at the Yamanashi maglev test line [J]. Quarterly Report of RTRI, 2000,41(2):63.