

牵引悬浮导向一体化超导电动磁浮列车 建模与电磁特性研究

王津^{1,2}, 葛琼璇^{1,2}, 赵鲁^{1,2}, 曾迪晖¹

(1. 中国科学院电工研究所 高密度电磁动力与系统全国重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:牵引悬浮导向一体化超导电动磁浮列车实现了一种地面线圈提供三维电磁力,对于降低建造成本和缩短周期具有重要意义。基于空间谐波法建立了牵引悬浮导向一体化电动磁浮列车数学模型,计算列车的磁感应强度以及电磁力。然后,建立了列车单侧的有限元模型,对空间谐波法进行验证。最后,基于对称模型,改变上下线圈高度成为非对称模型,设计非对称系统系数,研究起浮与稳定运行时的牵引、悬浮和导向电磁特性,结果表明非对称系统的悬浮特性更好,而对称系统的牵引性能更好,为牵引悬浮导向一体化电动磁浮列车的设计与优化提供理论基础。

关键词:超导磁体;有限元仿真;牵引悬浮及导向一体化线圈;磁浮列车

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26604

Modeling and Electromagnetic Performance Analysis of the Combined Propulsion Levitation and Guidance Superconducting Electrodynamic Suspension Maglev Train

WANG Jin^{1,2}, GE Qiongxuan^{1,2}, ZHAO Lu^{1,2}, ZENG Dihui¹

(1. State Key Laboratory of High Density Electromagnetic Power and Systems, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The combined propulsion, levitation, and guidance superconducting electrodynamic suspension maglev train is capable of achieving electromagnetic forces generated by ground coils, which is of significant importance for reducing construction costs and shortening development cycles. A mathematical model of the maglev train was established based on the space harmonic method, and the magnetic flux density and electromagnetic forces of the train were calculated. Then, a single-side finite element model of the maglev train was developed to validate the space harmonic method. Finally, an asymmetric model was designed by changing the heights of the upper and lower coils, based on the symmetrical model. An asymmetric system coefficient was introduced to investigate the propulsion, levitation, and guidance electromagnetic performances during lift-off and stable operation. The results indicated that the asymmetric system exhibited superior levitation performance, whereas the symmetric system demonstrates better propulsion performance. The findings of this analysis provide a theoretical foundation for the design and optimization of the combined propulsion, levitation, and guidance electrodynamic suspension maglev train.

Key words: superconducting magnets; finite element simulation; propulsion levitation and guidance coil; maglev train

在快速发展的社会和经济中,交通运输起着举足轻重的作用,不断变化的社会需求,包括乘

坐舒适性和环境考虑,对高速铁路运输提出新的要求^[1-4]。传统铁路列车和轨道直接接触,受限于

基金项目:国家自然科学基金(52307071)

作者简介:王津(1994—),女,博士研究生,主要研究方向为大功率电力电子与直线驱动,Email:wj2021syg@mail.iee.ac.cn

通讯作者:葛琼璇(1967—),女,博士研究生,研究员,博士生导师,主要研究方向为高压大功率变流器控制技术、高性能电机牵引控制技术,Email:gqx@mail.iee.ac.cn

传统轮轨系统的黏着极限,而磁悬浮列车无轮轨接触,其速度、载重以及舒适性等更为突出。超导电动磁浮列车是目前唯一经过600 km级时速载人运行检验的磁浮车,成为未来高速运输的非常有前景的技术之一。

超导电动磁浮列车电力系统由地面线圈和车载超导磁体构成,其中地面线圈包含牵引线圈和零磁通线圈。牵引线圈中通入三相交流电,产生运动的磁场,作为空芯直线同步电机的初级绕组,与车载超导磁体相互作用,产生牵引力,为列车的运行提供动力。零磁通线圈在超导磁体的高速运动作用下产生感应电流,进而提供悬浮力和导向力^[5]。对于超导电动磁浮列车建模方法,主要有动态电路理论模型、空间谐波法以及有限元模型等。文献[6]基于动态电路理论,建立了悬浮系统模型,分析了悬浮系统的电磁力以及动态运行特性。文献[7]基于空间谐波法建立了超导磁浮列车的牵引系统以及悬浮系统模型,提出了一种控制方法,能够在低速时提升列车的悬浮力。空间谐波法在超导电动磁浮系统中兼顾解析精度与计算效率,适合处理周期性磁场、研究超导磁体的电磁力分析以及控制问题。

目前国内外学者主要围绕地面线圈的结构、姿态以及电磁特性等开展研究。文献[8]以悬浮力作为优化目标,优化零磁通线圈结构参数,寻找悬浮系统稳态工作平衡位置。文献[9]研究了超导磁体发生多姿态变化时,直线同步电机的三维电磁力输出特性及其变化规律。然而超导电动磁浮列车的地面线圈的铺设成本一直是突出问题,文献[10]提出基于响应面设计和基于档案的微遗传算法,提升悬浮力,减少零磁通线圈质量,降低铺设成本。针对零磁通线圈而言,为了减少整体地面线圈的安装数量,文献[11]提出了一种集牵引、悬浮和导向(propulsion levitation and guidance, PLG)于一体的结构,在零磁通线圈中注入三相交流电成为组合线圈。这种设计无需增加额外的牵引线圈,显著减少了地面线圈数量,降低地面线圈安装成本。为确定组合线圈的可靠性,在宫崎线上进行了实际测试,研究表明组合线圈能够实现牵引悬浮和导向的功能。文献[12]基于动态电路理论,提出了一种计算不同交叉连接情况下的解析方法,建立了66自由度的PLG系统数学模型,模拟列车的实际运动工况,为分析列车的动态特性提供参考。文献[13]开发

了一个精确的模型来分析当PLG系统的超导磁体线圈经历偏转运动时,电磁力对三维电磁力、电磁转矩和电磁刚度的影响,采用电流补偿方法抑制电磁力纹波,以提高PLG系统的运行性能。

本文基于空间谐波法建立牵引悬浮导向一体化模型,通过傅里叶级数展开的形式描述超导磁体的空间磁场分布,分析牵引、悬浮以及导向电磁力的特性,并建立有限元模型进行验证。基于对称的PLG模型,建立非对称模型,研究非对称模型起浮与稳态时的电磁特性,为提升超导磁浮列车的电磁性能提供理论参考。

1 超导电动磁浮列车的结构及建模

超导电动磁浮列车由磁浮列车、超导磁体、U型轨道和PLG线圈组成,其参数位于表1中。超导电动磁浮列车截面图如图1所示,超导磁体安装在车身两侧,左右两侧超导磁体的磁场相反,PLG线圈位于U型轨道,与超导磁体组成牵引悬

表1 超导电动磁浮列车参数

Tab.1 Parameters of superconducting electrodynamic suspension maglev train

	符号	描述	数值
PLG线圈	a_1	线圈长度	755 mm
	b_1/b_2	上/下线圈高度	300/300 mm
	N_1	线圈匝数	48匝
	g	上下线圈垂直间隙	100 mm
	τ_1	线圈极距	900 mm
	I_1	相电流有效值	450 A
	R_1/R_2	上/下线圈电阻	31.9/31.9 mΩ
	L_1/L_2	上/下线圈电感	1.83/1.83 mH
超导磁体	a_0	线圈长度	1 070 mm
	b_0	线圈高度	500 mm
	N_0	线圈匝数	1 400匝
	I_0	励磁电流	500 A
	τ_0	线圈极距	1 350 mm
	y_1	超导磁体与PLG线圈水平间距	195 mm
z_0	超导磁体与PLG线圈中心垂直间距	0 mm	

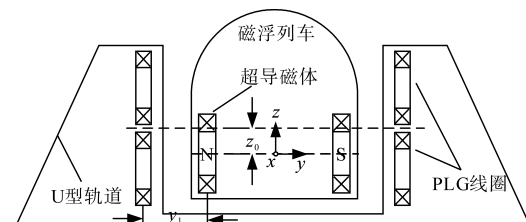


图1 超导电动磁浮列车系统截面图

Fig.1 Cross-section of the EDS maglev train

浮导向系统,实现列车的前进、悬浮和导向功能。

超导电动磁浮列车,一对超导磁体对应三组PLG线圈,每组PLG线圈的对应的电角度为120°。定义x方向为列车的前进方向,y方向为水平方向,z方向为垂直方向。

为采用空间谐波法求解超导磁体的磁动势空间分布,需建立周期性磁极分布假设:设磁体磁极沿x轴和z轴方向在xoz平面内呈周期性交替排列,由此构建具有空间周期性的磁动势分布模型,得到超导磁体在xoz平面上的磁动势:

$$F = \sum_{n=1,3,5,\dots} \sum_{m=1,3,5,\dots} \frac{16N_0I_0}{mn\pi^2} \sin\left(\frac{m\pi a_0}{2\tau_0}\right) \cos\left(\frac{m\pi}{2\tau_0}\right) \sin\left(\frac{n\pi b_0}{2\tau_z}\right) \cos\left(\frac{n\pi}{2\tau_z}\right) \quad (1)$$

式中: τ_z 为傅里叶级数计算时假设的超导磁体在垂直方向的极距, $\tau_z = l \cdot b_0, l = 3\sim 5$ 。

由边界条件和拉普拉斯方程得到空间的标量磁位:

$$\Psi = \sum_m \sum_n \frac{8N_0I_0}{mn\pi^2} \sin\left(k_{xm} \frac{a_0}{2}\right) \sin\left(k_{zn} \frac{b_0}{2}\right) \cdot \cos(k_{xm}x) \cos(k_{zn}z) e^{-\lambda_{mn}y} \quad (2)$$

其中

$$k_{xm} = m \frac{\pi}{\tau_0} \quad k_{zn} = n \frac{\pi}{\tau_z} \quad m, n = 1, 3, 5, \dots$$

$$\lambda_{mn} = \sqrt{k_{xm}^2 + k_{zn}^2}$$

根据标量磁位与磁感应强度的关系,得到超导磁体在y方向产生的磁感应强度:

$$B_y = \frac{8\mu_0 N_0 I_0}{\tau_0 \tau_z} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{n=1,3,5,\dots} \lambda_{mn} f_0(m,n) \cos(k_{xm}x) \cos(k_{zn}z) e^{-\lambda_{mn}y} \quad (3)$$

其中

$$f_0(m,n) = \frac{\sin\left(k_{xm} \frac{a_0}{2}\right) \sin\left(k_{zn} \frac{b_0}{2}\right)}{k_{xm} k_{zn}}$$

式中: μ_0 为空气的磁导率; $f_0(m,n)$ 为与超导磁体尺寸排列相关的函数。

设第k个PLG线圈的中心坐标为 (x_k, y_k, z_k) ,当PLG线圈提供悬浮力和导向力时,不考虑牵引电流,其电路为上下线圈反向串联,悬浮和导向电流由超导磁体高速运动产生,线圈的净磁通 Φ_k 为上下线圈的磁通之差,其中第k个PLG中的净磁通为

$$\Phi_k = \sum_{m=1}^{\infty} P_1(m) \cos(k_{xm}x_k) \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} P_1(m) = \frac{8\mu_0 N_0 I_0}{\tau_1 \tau_z} \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_{mn} f_0(m,n) f_1(m,n) \cdot \sin[k_{zn}(z_k + z_0)] e^{-\lambda_{mn}y_k} \\ f_1(m,n) = \frac{\sin\left(k_{xm} \frac{a_1}{2}\right) \sin\left(k_{zn} \frac{b_1}{2}\right)}{k_{xm} k_{zn}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_1(m)$ 为反映超导磁体与PLG线圈之间耦合松紧程度的函数; $f_1(m,n)$ 为与PLG线圈尺寸排列相关的函数。

第k个PLG线圈的总电阻和电感分别为 R_k 和 L_k ,对应的电压方程为

$$R_k i_{k2} + L_k \frac{di_{k2}}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi_k}{dt} \quad (6)$$

式中: i_{k2} 为悬浮导向的感应电流。

i_{k1} 为第k个PLG线圈的牵引电流,根据牵引电流和悬浮导向电流,计算k个PLG线圈的总能量 W_k 。基于能量法计算牵引力 F_x 、悬浮力 F_z 和导向力 F_y :

$$\begin{cases} F_x = \frac{\partial W_k}{\partial x} = \frac{\partial [\Phi_k(i_{k1} + i_{k2})]}{\partial x} \\ F_y = \frac{\partial W_k}{\partial y} = \frac{\partial [\Phi_k(i_{k1} + i_{k2})]}{\partial y} \\ F_z = \frac{\partial W_k}{\partial z} = \frac{\partial [\Phi_k(i_{k1} + i_{k2})]}{\partial z} \end{cases} \quad (7)$$

其中,以牵引电流 i_{k1} 的方向作为正方向,悬浮导向感应电流 i_{k2} 与牵引电流同方向时取正值,反之取负值。

2 有限元仿真

本文在ANSYS中建立了超导电动磁浮列车的三维有限元模型,由于PLG线圈沿U型轨道铺设,而有限元模型的求解域有限,为提高求解速度,并且真实反映电磁性能,建立列车单侧最小单元模型,即将超导电动磁浮列车简化为一对超导磁体和三组PLG线圈,如图2所示。

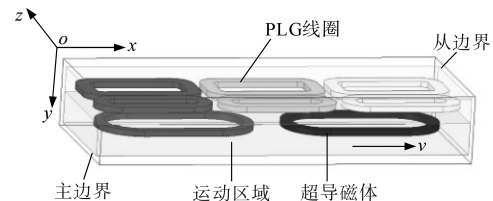


图2 超导电动磁浮列车三维有限元模型

Fig.2 Finite element model of EDS maglev train

基于有限元建立的超导电动磁浮列车模型对空间谐波法建立的解析模型进行验证。如图3

所示,超导磁体表面的磁感应强度2 T左右,空间谐波法与有限元模型的计算结果趋势相同,幅值相近。图4为PLG线圈表面的磁感应强度,磁感应强度随着水平距离增加衰减,PLG线圈距离超导磁体水平距离为195 mm,其表面磁感应强度相比超导磁体的衰减为0.85 T,衰减了57.5%左右。

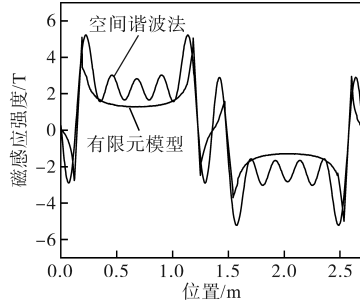


图3 空间谐波法与有限元仿真超导磁体表面磁感应强度

Fig.3 Space harmonic method and finite element model of the magnetic flux density of the superconducting magnet

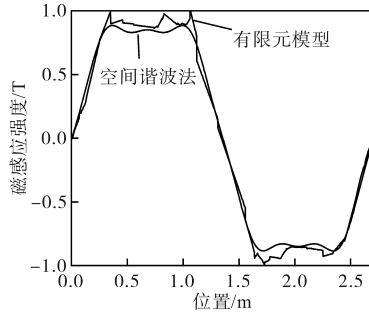
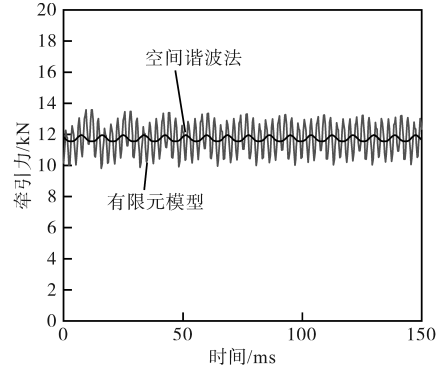


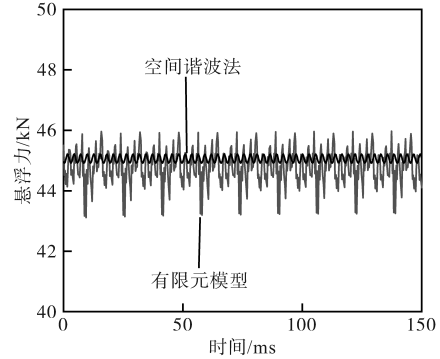
图4 空间谐波法与有限元仿真PLG线圈表面磁感应强度

Fig.4 Space harmonic method and finite element model of the magnetic flux density of the PLG

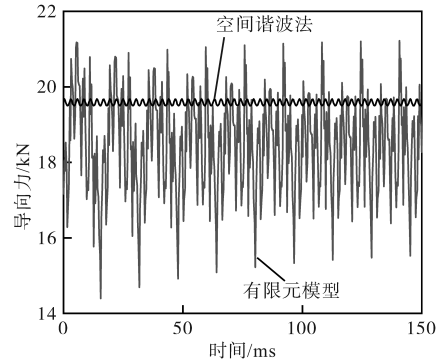
图5为列车运行速度为600 km/h, z_0 为40 mm时的牵引力、悬浮力以及导向力波形。图5a为牵引力波形,有限元模型与空间谐波法模型的均值在11 kN左右,有限元模型波动约为9%,空间谐波法模型的波动较小约为1.7%。图5b为悬浮力波形,有限元模型的均值在44 kN左右,波动约为2%,空间谐波法的均值约为45 kN,波动约为0.4%。图5c为单侧的导向力波形,有限元模型的均值在18 kN左右,波动约为16%,空间谐波法的均值约为19.6 kN,波动约为0.5%。空间谐波法由于在计算过程中仅考虑了主要谐波分量,因此得到的力波形波动较小;而有限元模型能够更精确地反映实际电磁场中的高频谐波和边缘效应,故计算结果波动更为明显。空间谐波法与有限元模型计算均值相近,验证了空间谐波法的有效性,研究电磁力均值特性时,可选择空间谐波法来提高计算效率。



(a)牵引力



(b)悬浮力



(c)导向力

图5 空间谐波法与有限元仿真电磁力对比

Fig.5 Space harmonic method and finite element model of electromagnetic forces

3 非对称PLG线圈电磁特性

表1中超导电动磁浮列车的PLG线圈上、下线圈高度相等,是对称型模型。当 z_0 为0时,PLG线圈与超导磁体中心对齐,此时,PLG线圈中无感应电流,无法提供悬浮力和导向力,只能作为牵引线圈提供牵引力。当超导磁体运行在PLG线圈中心线之下时,即存在向下的偏移量 z_0 ,此时PLG线圈中上、下线圈交链的磁通不同,净磁链不为零,环路内部产生感应电流相连接,能够提供悬浮力和导向力。

当PLG线圈上、下线圈高度不同时,即为非对称线圈。当 z_0 为0时,超导磁体运行在中心高

度时,由于PLG上、下线圈的高度不同,上、下线圈通过的磁通不能完全抵消,净磁通不为零,PLG线圈产生感应电流,能为列车提供悬浮力和导向力。相比对称型的PLG线圈,在中心垂直无偏移时,便可产生悬浮力与导向力。

对称线圈和非对称线圈结构如图6所示。

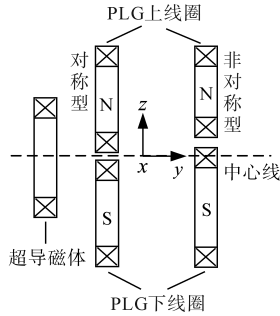


图6 对称线圈和非对称线圈的结构

Fig.6 The structure of the symmetric and asymmetric PLG

为了研究非对称PLG系统的特性,首先设计其线圈非对称系数 H 为上、下线圈高度之比,上、下线圈高度和保持恒定为0.6 m,如下式所示:

$$\begin{cases} H = \frac{b_1}{b_2} \\ b_1 + b_2 = 0.6 \end{cases} \quad (7)$$

H 分别为0.4,0.6,1以及1.2,随着 H 的增加,上线圈高度增加,下线圈高度减小。

研究超导电动磁浮列车在起浮速度150 km/h和稳定运行速度600 km/h、起浮垂直偏移80 mm与稳定运行偏移40 mm工况下,基于空间谐波法算出的一对超导磁体对应的电磁力随 H 变化特性。

3.1 牵引力

图7a为速度分别为150 km/h和600 km/h, z_0 为80 mm时,超导磁浮列车的牵引力随 H 变化的曲线。同一速度下,牵引力随着 H 的增加先增大后减小,在 $H=1$ 时牵引力达到最大,此时属于PLG上、下线圈高度相同的情况,速度为150 km/h对应的最大牵引力为11.12 kN,速度为600 km/h对应的最大牵引力为12.98 kN。当 H 恒定时,随着速度的增加,牵引力增加。

图7b为速度分别为150 km/h和600 km/h, z_0 为40 mm时,超导磁浮列车的牵引力随 H 变化的曲线。牵引力变化趋势与偏移80 mm时相同,在 $H=1$ 时达到最大值,速度为150 km/h对应的最大牵引力为11.17 kN,相比 z_0 为80 mm时增长了0.4%,低速时发生垂直偏移对牵引力的影响较小;速度为600 km/h对应最大牵引力为11.7 kN,

相比 z_0 为80 mm时下降了9.9%,高速时发生垂直偏移对牵引力的影响较大。在高速运动过程中尽量保持运行的平稳,减小垂直偏移波动,减小牵引力波动。

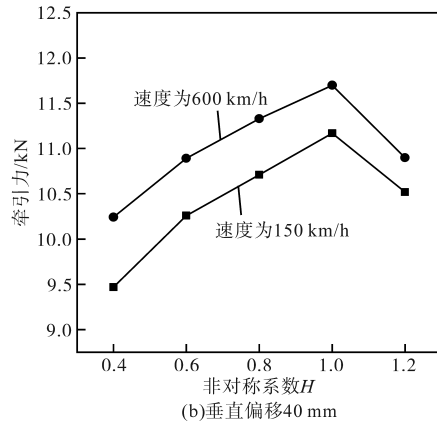
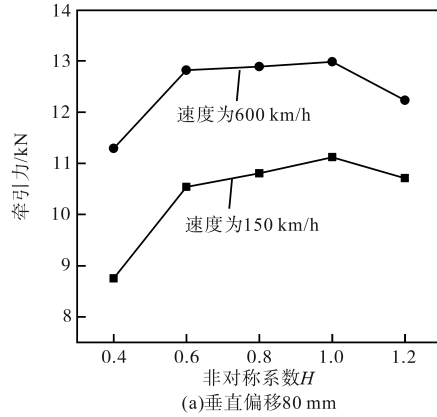


图7 随非对称系数 H 变化的牵引力曲线

Fig.7 The propulsion force curve varies with the H

3.2 悬浮力

图8a为速度分别为150 km/h和600 km/h, z_0 为80 mm时,超导磁浮列车的悬浮力随 H 变化的曲线。同一速度下,悬浮力随着 H 的增加而减小,在一定范围内,上线圈与下线圈非对称性越好,系统的悬浮力越大,当 H 超过0.8后,即非对称性变差,悬浮力下降的速度加快。当 $H=0.4$ 时对应的悬浮力较大,速度为150 km/h对应的最大悬浮力为94.14 kN,速度为600 km/h对应的最大悬浮力为96.48 kN。当 H 恒定时,随着速度的增加,悬浮力增加。

图8b为速度分别为150 km/h和600 km/h, z_0 为40 mm时,超导磁浮列车的悬浮力随 H 变化的曲线。悬浮力变化趋势与偏移80 mm时相同,在 $H=0.4$ 时达到最大值,速度为150 km/h对应的最大悬浮力为52.57 kN,相比 z_0 为80 mm时下降了44.16%;速度为600 km/h对应的最大悬浮力为54.1 kN,相比 z_0 为80 mm时下降了43.93%。列车

在运行过程中,起浮时速度较低,由于重力的作用垂直偏移较大,随着速度的增加,悬浮力增加,垂直偏移减小,最后悬浮力与重力相等,达到稳定运行状态。

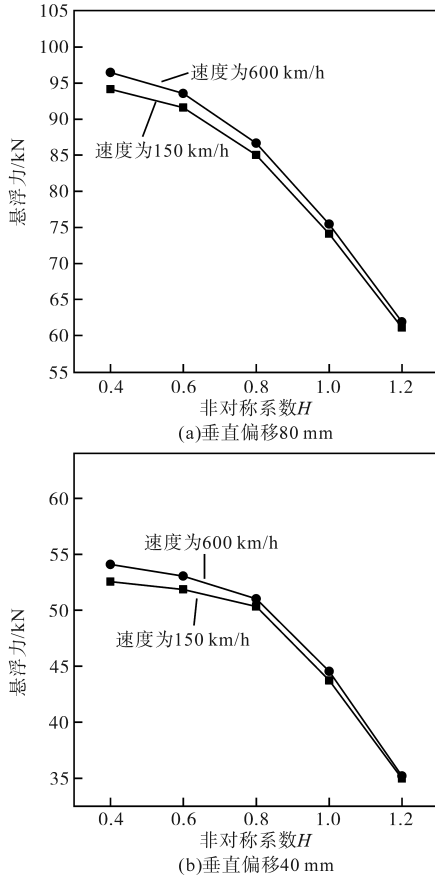


图8 随非对称系数 H 变化的悬浮力曲线
Fig.8 The levitation force curve varies with the H

3.3 导向力

图9a为速度分别为150 km/h和600 km/h, z_0 为80 mm时,超导磁浮列车单侧导向力随 H 变化的曲线。同一速度下,导向力随着 H 增加先增加后减小。当 $H=0.8$ 时对应的导向力较大,速度为150 km/h对应的最大导向力为53.1 kN,速度为600 km/h对应的最大导向力为54.1 kN。当 H 恒定时,随着速度的增加导向力增加。

图9b为速度分别为150 km/h和600 km/h, z_0 为40 mm时,超导磁浮列车的导向力随 H 变化的曲线。导向力随 H 增加而增加,速度为150 km/h对应的最大导向力为19.02 kN,相比 z_0 为80 mm时下降了64.18%;速度为600 km/h对应的最大导向力为19.2 kN,相比 z_0 为80 mm时下降了64.51%。由于超导磁浮列车具有对称性,当列车位于轨道中间时,左右两侧导向力相等,单侧导向力能体现单边轨道的法向应力。

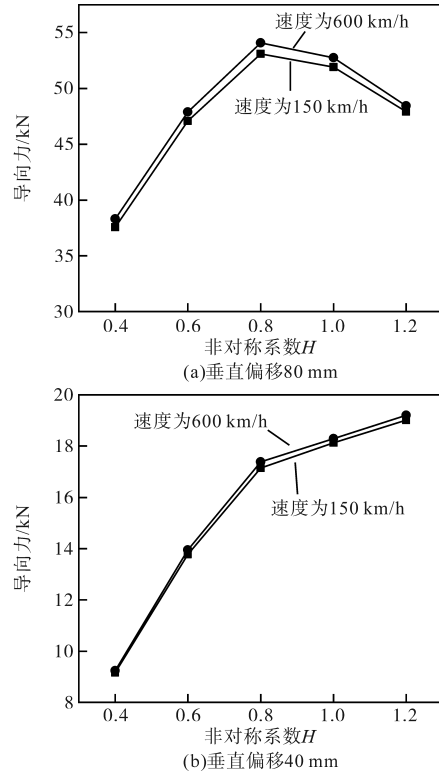


图9 随非对称系数 H 变化的单侧导向力曲线
Fig.9 The single-side guidance force curve varies with the H

4 结论

本文对牵引悬浮导向一体化超导电动磁浮列车的电磁特性进行了系统研究。首先基于空间谐波法建立了一体化超导电动磁浮列车的数学模型,并通过有限元模型对计算结果进行了验证。通过对比两种方法得到的磁感应强度及电磁力结果,证实了空间谐波法的有效性。

在此基础上,重点研究了非对称一体化系统的电磁特性。通过计算起浮与运行稳定状态下系统随不同非对称系数的变化规律,系统分析了牵引、悬浮和导向特性。研究表明,非对称线圈结构虽然能够提升悬浮特性,但会对牵引性能产生一定的削弱作用。本文为牵引悬浮导向一体化电动磁浮列车的设计与优化提供了理论依据。

参考文献

[1] 熊嘉阳,邓自刚. 高速磁悬浮轨道交通研究进展[J]. 交通运输工程学报,2021,21(1):177-198.
XIONG Jiayang, DENG Zigang. Research progress of high-speed maglev rail transit[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 177-198.
[2] 刘士宽,王磊,王路忠,等. 电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述[J]. 西南交通大学学报,2023,58(4):734-753.
LIU Shixian, WANG Lei, WANG Luzhong, et al. Review on

- electrodynamic suspension trains and on-board superconducting magnets[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(4): 734-753.
- [3] NASIRI-ZARANDI R, HEKMATI A. A review of suspension and traction technologies in maglev trains[C]//2019 International Power System Conference (PSC), IEEE, 2019.
- [4] 邓桂美,张越,贺永鹏,等. 高速磁浮车载电网组网测试系统[J]. 电气传动, 2025, 55(2): 82-86, 96.
DENG Guimei, ZHANG Yue, HE Yongpeng, et al. High-speed maglev onboard power net networking test system[J]. Electric Drive, 2025, 55(2): 82-86, 96.
- [5] YONEZU T, WATANABE K, SUZUKI E, et al. Study on electromagnetic force characteristics acting on levitation/guidance coils of a superconducting maglev vehicle system[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 1-5.
- [6] 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): 1162-1170.
WANG Zhitao, CAI Yao, GONG Tianyong, et al. Characteristic studies of the superconducting electrodynamic suspension train with a field-circuit-motion coupled model[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 1162-1170.
- [7] GAO Y, WEI R, XUE Z, et al. Analysis of armature current assisted suspension force control of EDS maglev[C]//IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), 2023: 183-187.
- [8] 谭富星,李凯,于森,等. 超导电动悬浮试验线悬浮系统设计及验证[J]. 机车电传动, 2024(3): 13-18.
TAN Fuxing, LI Kai, YU Miao, et al. Design and verification of levitation system for superconducting electrodynamic suspension test line[J]. Electric Drive for Locomotives, 2024(3): 13-18.
- [9] 李婧,徐佳明,刘康,等. 高温超导直线同步电机磁力仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4513-4524.
LI Jing, XU Jiaming, LIU Kang, et al. Simulation and experimental study on electromagnetic forces characteristic of high temperature superconducting linear motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4513-4524.
- [10] LUO J, CUI L, MA Z G, et al. Fast optimization of null-flux coils for superconducting electrodynamic suspension train with RSM and AMGA[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, 32(5): 1-8.
- [11] MURAI T. Characteristics of LSM combined propulsion, levitation and guidance[J]. Electrical Engineering in Japan, 1995, 115(4): 134-145.
- [12] SU Z. Vertical-lateral coupled dynamic model for integrated propulsion, levitation and guidance superconducting EDS train[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(5): 4364-4380.
- [13] FU X, HUANG J, WANG D, et al. Electromagnetic characteristics analysis and thrust fluctuation optimization in integrated propulsion, levitation, and guidance systems[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2024, 34(6): 1-10.

收稿日期:2025-04-30

修改稿日期:2025-06-14