



小型化磁浮列车双线圈悬浮电磁铁结构及性能分析

刘普栋¹, 徐俊起^{1,2}, 陈琛^{1,2}, 苏芷玄³, 窦庆山³

(1. 同济大学 交通学院, 上海 201804;

2. 同济大学 国家磁浮交通工程技术研究中心, 上海 201804;

3. 湖南轨道技术应用研究中心有限公司, 湖南 长沙 410027)

摘要: 为适配中低速磁浮列车小型化、轻量化发展需求, 实现列车悬浮、导向、牵引一体化发展, 文章对双线圈包裹极板的小型化悬浮电磁铁结构进行探讨。通过等效磁路法与有限元仿真法系统分析其电磁特性、悬浮性能及被动导向能力。首先, 建立单电磁铁等效磁路模型, 经合理假设推导垂向电磁力计算公式, 明确线圈匝数、输入电流、悬浮间隙等参数对电磁力的影响规律; 然后, 结合现有轨道尺寸规范确定电磁铁核心参数, 定量分析不同悬浮间隙与控制电流下的悬浮力变化特性; 最后, 基于COMSOL软件构建三维有限元模型, 仿真探究了额定工况下的磁场分布特征, 并分析了0~14 mm磁极侧向偏移范围内的励磁安匝数变化及导向恢复力特性。结果表明: 控制电流对悬浮力影响显著, 且气隙越小、电流越大, 悬浮力受参数变化的影响越明显。额定工况下, 铁芯与极板主体区域磁通密度未达饱和阈值, 气隙磁感应强度分布均匀, 具备良好工程合理性; 磁极侧向偏移时, 励磁安匝数随偏移量单调递增, 14 mm偏移时增幅达22.9%, 且大偏移工况下电磁铁与轨道磁场仍保持均匀分布。该新型双线圈悬浮电磁铁结构预留了直线电机安装空间, 可构建悬浮-牵引-导向一体化电磁系统, 其性能特征为中低速磁浮列车小型化设计提供了理论依据与数据支撑。

关键词: 中低速磁浮列车; 悬浮电磁铁; 双线圈结构; 等效磁路法; 有限元仿真; 电磁特性; 被动导向

中图分类号: U266.4; U237

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)02-0051-07

0 引言

中低速磁浮列车因其无接触运行带来的低磨损、低振动、低噪声及强爬坡能力等优势, 已成为填补城市轨道交通空缺的重要技术发展方向。其中, 常导电磁吸力悬浮(EMS)型因技术成熟度高, 已成为当前研究与工程应用的主流^[1-2]。悬浮电磁铁作为EMS型磁浮列车的核心执行部件, 其电磁特性、结构设计及动力学性能直接决定列车的悬浮稳定性、承载能力与运行安全性, 因此相关研究一直是行业关注的焦点^[3-4]。

在悬浮电磁铁建模与电磁特性分析方面, 学者们形成了以等效磁路法和有限元仿真为核心的两类主流技术路径。等效磁路法通过将磁场矢量分析转化为标量分析, 简化磁路计算过程, 已广泛应用于电磁铁电磁力表达式的推导^[5-6]。文献[7-8]提出悬浮电磁铁实现最优设计的条件与原则, 并完成了对应悬浮电磁铁的理论计算, 所得结果与试验曲线基本吻合。文献[9-10]基于该方法建立全尺寸悬浮电磁铁磁路模型, 推导包含线圈匝数、极板尺寸等结构参数的垂向电磁力表达式, 明确了各参数与电磁力的相关性规律。文献[11]借鉴U形电磁铁的基本结构参数进行3D有限元仿真, 根

基金项目: 湖南省科技创新计划项目(2024QY2002); 国家自然科学基金项目(52232013, 52502449); 快速磁浮(低运量)交通系统成套技术攻关-梁轨一体化新型悬浮系统合作开发协议(KSCF2025-X03)

通信作者: 徐俊起, 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事磁浮列车悬浮控制的研究; E-mail: xujunqi@tongji.edu.cn

引用格式: 刘普栋, 徐俊起, 陈琛, 等. 小型化磁浮列车双线圈悬浮电磁铁结构及性能分析[J]. 机车电传动, 2026(2): 51-57.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.006.

Citation: LIU Pudong, XU Junqi, CHEN Chen, et al. Structural and performance analysis of compact dual-coil levitation electromagnets for maglev trains[J]. Electric drive for locomotives, 2026(2): 51-57.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.006.

据电磁力仿真结果,分析得到影响电磁力特性的主要结构参数为铁芯长度、磁极宽度、线圈厚度和励磁电流等,优化U形电磁铁的结构。文献[12]进一步通过该方法结合动力学分析,提出了铁芯高度的合理取值范围。有限元法则凭借其对复杂磁场分布的精准表征能力,成为电磁特性仿真的重要工具,文献[13]采用三维有限元方法研究悬浮电磁铁电磁场分布及磁饱和特性,文献[14]则通过该方法完成电磁铁线圈电感的精准计算,为控制系统设计提供关键参数。两类方法的结合应用,实现了从理论建模到实际特性仿真的完整分析链条。

结构参数优化是提升悬浮电磁铁性能的核心手段,相关研究聚焦于关键参数对电磁力与悬浮性能的影响机制。线圈匝数作为最具敏感性的结构参数,该参数变化会显著影响电磁力,但同时也会提高悬浮力的控制难度^[15-16]。除线圈匝数外,铁芯高度、极板尺寸等参数的优化研究也取得阶段性成果,文献[17]提出新型电磁铁线包排布方案,通过优化铁芯长度提升电磁力性能;文献[18]则通过有限元仿真分析了电流斜坡加载斜率与电磁铁能量损失的关系,为参数匹配提供参考。文献[19]通过优化电磁铁结构,显著降低磁浮列车的控制复杂度。文献[20]通过解析法得出电磁铁在静态时的电磁力,根据钢轨的涡流效应及其特点,计算了考虑钢轨涡流影响的电磁铁瞬态电磁力,分析了气隙磁感应强度以及悬浮力随速度变化的关系。在动力学性能与导向机制研究领域,悬浮电磁铁与整车系统的耦合特性及导向功能实现是研究重点。文献[21]采用SIMPACK多体动力学软件,建立含悬浮电磁铁的整车动力学模型,分析直线与曲线工况下的动力学特性,并对电磁铁的导向特性进行分析。文献[22]通过有限元软件仿真表明,使用叠片F轨后可以降低轨道中的涡流,随着叠片数量的增加,气隙磁场逐渐逼近静态条件下的气隙磁场。文献[23]通过对悬浮电磁铁进行二维与三维多次仿真,研究电流、气隙和水平偏移等对电磁铁性能的影响,并分析结论和试验结果。文献[24]则搭建了一套小型的轨道与电磁铁试验系统,借助传感器测得的加速度与悬浮间隙数据,分析电流幅值与电磁铁长度之间的关联,通过该模型对全尺寸系统的特性进行了预测。文献[25]基于端部电磁铁悬浮控制稳定性差的原因,提出了一种端部电磁铁优化方案,并验证优化后电磁铁方案的合理性。

综上所述,众多学者已对悬浮电磁铁进行多方面的优化研究,为中低速磁浮列车的性能提升与工程化应用提供了较为全面的技术支撑;但现存EMS型中低速磁浮列车电磁铁多采用线圈包裹底板铁芯的结构形式,该方式占用了“U”型电磁铁的内部空间,无法与直线电机适配兼容,同时增大了车辆的体积与重量,不利于未来列车小型化、轻量化的发展趋势。针对上

述问题,本文研究采用双线圈包裹极板的形式,将电磁铁内部空间释放出来,为直线电机预留安装位置,有利于构建悬浮-牵引-导向一体化电磁系统,可助力中低速磁浮列车实现轻量化设计与工程化发展。

1 悬浮电磁铁模型

EMS型中低速磁浮列车电磁铁采用电磁吸力实现悬浮,并通过主动控制线圈电流以保证悬浮的稳定性,稳定悬浮间隙一般为7~10 mm。双线圈悬浮系统结构主要包括悬浮电磁铁、轨道、控制器、传感器等,其基本结构如图1所示。悬浮电磁铁由2个线圈、2个铁芯和2个单侧极板组成,通过给2个线圈通电产生电磁力,实现悬浮与导向功能。

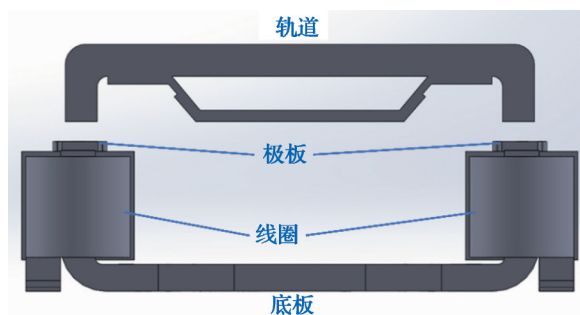


图1 双线圈悬浮系统结构

Fig. 1 Structure of the dual-coil levitation system

等效磁路法是分析磁路问题的经典工程方法,其核心是将磁场的矢量分析转化为类似电路的标量分析,通过类比电路的基本定律和参数,简化磁路的计算与分析。为简化分析过程,做出如下假设:

① 考虑气隙磁阻与底板、双侧极板的磁饱和效应,忽略磁滞效应的影响。

② 假定整个磁回路内磁场呈均匀分布特性,即磁感应强度在磁回路全域保持一致。

③ 忽略气隙区域的漏磁现象及漏磁通的影响。

以单悬浮电磁铁为对象,建立单电磁铁的等效磁路,如图2所示。

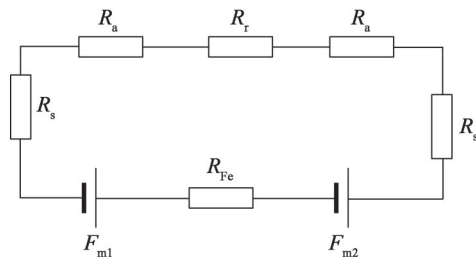


图2 单电磁铁等效磁路

Fig. 2 Equivalent magnetic circuit of a single electromagnet

图2中, F_{m1} 、 F_{m2} 分别为左右单个线圈产生的磁动势, R_s 为极板磁阻, R_a 为气隙磁阻, R_{Fe} 为底板磁阻, R_r 为轨道磁阻。根据磁路中的磁动势基尔霍夫定律可知

$$\sum_{k=1}^n F_{mk} = \sum_{i=1}^p (\Phi_i R_i) \quad (1)$$

式中: Φ_i 为通过各磁阻的磁通量, 在该磁路中处处相等; R_i 为各个磁阻。

悬浮系统磁回路的总磁动势可表示为

$$F_{mk} = N_k i_k \quad (2)$$

式中: N_k 为产生第 k 个磁动势的悬浮电磁铁线圈匝数; i_k 为产生第 k 个磁动势的电磁铁线圈输入电流。

回路中总磁阻 R_m 由各部分磁阻组成, 即

$$R_m = \sum_{i=1}^p R_i = R_{Fe} + 2R_s + 2R_a + R_r \quad (3)$$

底部铁芯磁阻可表示为

$$R_{Fe} = \frac{b_1}{\mu_0 \mu_{r1} A_1} \quad (4)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; μ_{r1} 为悬浮电磁铁铁芯的相对磁导率; b_1 为铁芯宽度; A_1 为铁芯磁路面积。

铁芯磁路面积近似为矩形, 可表示为

$$A_1 = l \omega_1 \quad (5)$$

式中: l 为极板长度; ω_1 为铁芯高度。

极板磁阻可表示为

$$R_s = \frac{b_2}{\mu_0 \mu_{r2} A_2} \quad (6)$$

式中: μ_{r2} 为极板的相对磁导率; b_2 为极板宽度; A_2 为极板磁路面积, 与铁芯磁路面积相等。

气隙磁阻可表示为

$$R_a = \frac{\delta}{\mu_0 A} \quad (7)$$

式中: δ 为悬浮间隙; A 为气隙磁路面积。

气隙磁路面积可表示为

$$A = l \omega \quad (8)$$

该悬浮电磁铁采用的极板与铁芯材料均选取 Q235 钢材, 即二者磁化特性相同, $\mu_{r1} = \mu_{r2} = \mu_r$ 。悬浮电磁铁的垂向电磁力可表示为

$$F = \frac{B^2 A}{\mu_0} \quad (9)$$

设置左右两极板线圈安匝数相同, 此时产生的磁动势的大小相等, 即 $F_{m1} = F_{m2} = Ni$ 。

当极板宽度与铁芯高度相差很小时, 结合式(1)~式(9), 单电磁铁产生的垂向电磁力可表示为

$$F_m = F_{m1} + F_{m2} = \frac{2N^2 i^2 \mu_0 \mu_r^2 l \omega}{\delta^2 \mu_r^2 + 4(b_1 + b_2)(\delta \mu_r + b_1 + b_2)} \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 悬浮电磁铁的垂向电磁力与两侧极板的线圈匝数、线圈电流、极板宽度、铁芯高度、悬浮间隙等因素有关。因此, 若要增大悬浮力, 可通过增加两极板线圈匝数、增大电流、增大极板宽度与铁芯高度或减小悬浮气隙、减小极板宽度等方式来实现。

为适配现有中低速磁浮线路的轨道既定尺寸规范, 悬浮电磁铁的本体结构尺寸与铁芯、极板等核心部件

的材料选型均保持不变。综合考虑轨道尺寸、悬浮力与控制精度的影响, 选取单悬浮电磁铁的相关参数如表1所示。

表1 悬浮电磁铁参数

Table 1 Parameters of the suspension electromagnet

参数项目	参数值或说明
电磁铁长度/mm	1 183.5
极板长度/mm	1 000
额定气隙/mm	8
磁极宽度/mm	27
额定电流/A	35
线圈匝数	160
铁芯材料	Q235

在此前提下, 提升悬浮电磁铁垂向悬浮力的调控方式, 更多聚焦于电磁参数的动态优化, 主要通过改变线圈电流和调节悬浮间隙, 实现悬浮力的动态调控, 以满足列车不同载荷工况下的悬浮需求。根据式(10)计算得到不同悬浮间隙、不同悬浮电流下的电磁悬浮力变化曲线如图3所示。

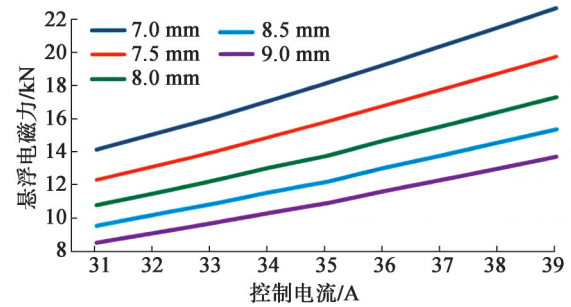


图3 悬浮电磁力随悬浮间隙与电流的变化

Fig. 3 Variation of suspension electromagnetic force with levitation gap and current

在额定气隙与额定电流条件下, 电磁铁的悬浮力可达 13.8 kN。在所有气隙条件下, 随着控制电流从 31 A 增加到 39 A, 悬浮电磁力增加 30%~40%, 这表明电流变化对悬浮力的影响较为显著, 且气隙越小, 电磁力受电流变化的影响越大。当控制电流相同时, 随着气隙的增大悬浮电磁力减小, 且气隙越小, 悬浮电磁力随气隙变化的力差值越显著。电流越大, 悬浮电磁力随气隙的变化越显著。

2 单电磁铁有限元仿真分析

为了研究实际磁路结构对电磁铁悬浮力的影响, 本研究采用有限元方法对悬浮电磁铁开展三维电磁场数值分析。为提升计算效率并简化建模流程, 对三维实体模型进行了合理简化: 忽略极板与铁芯上的螺栓孔等局部结构细节, 并将其等效为连续均质的整体构件。

采用 COMSOL 软件建立电磁铁与轨道的有限元三

维模型,选取单侧极板的线圈匝数为160匝,通入35 A的额定电流,得到的悬浮电磁铁三维磁场分布图如图4所示。

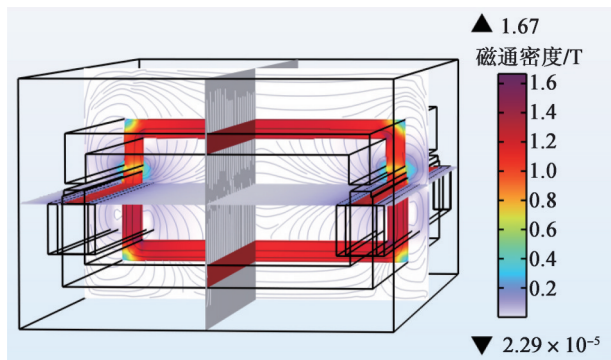


图4 悬浮电磁铁三维磁场分布

Fig. 4 Three-dimensional magnetic field distribution of the suspension electromagnet

材料Q235的饱和磁通密度约为1.4 T。由图4可看出,铁芯对应区域的磁通密度显著升高,除因钝化处理导致局部磁通密度升高的拐角区域外,极板主体区域的磁通密度均未达到材料饱和阈值。

图5为悬浮电磁铁与轨道气隙中心处沿纵向长度分布的磁通密度。其中,外侧(绿色线条)的磁通密度整体略高于内侧(蓝色线条),大部分区间维持在0.83~0.87 T之间,平均值为0.848 T;内侧的磁通密度主要集中在0.81~0.85 T之间,平均值为0.836 T,内、外气隙磁感应强度的总体平均值为0.842 T。

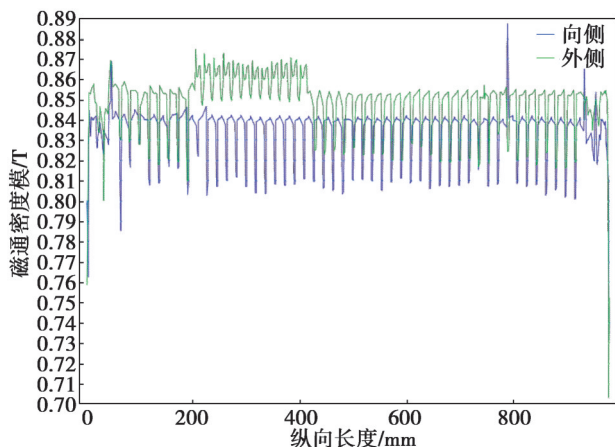


图5 悬浮电磁铁极板与轨道气隙中心处的磁通密度

Fig. 5 Magnetic flux density at the center of the air gap between the pole plate and the track

仿真出的悬浮力大小为16.8 kN,略大于第1章中同条件下的理论计算值,这是由于有限元仿真计算了边缘效应所致。由此可得出额定条件下该双线圈电磁铁每米可承载1.45 t的质量,与现有中低速磁浮列车电磁铁的试验结果相近^[9]。

中低速磁浮依靠磁场畸变的自稳定特性实现被动导向,通过磁力的自适应调节完成横向定位。与高速磁浮采用的主动导向方案相比,该方式具备结构简洁、

造价低、维护便捷等优势。

中低速磁浮交通的导向功能同样由悬浮电磁铁实现。当车辆相对轨道发生横向偏移时,悬浮磁场会发生畸变,电磁铁与轨道间的磁吸力呈不对称分布,在提供垂向悬浮力的同时,生成指向轨道中心的横向恢复力。因此,车辆无须设置独立导向电磁铁,即可在行驶过程中完成自对中与自动导向。

悬浮电磁铁在不同横向侧移量下,会产生与位移相关的导向恢复力。在保证车辆满载工况悬浮(悬浮力达12 kN/m)时,所需的线圈安匝数、导向力随悬浮电磁铁偏移量的变化如图6、图7所示。

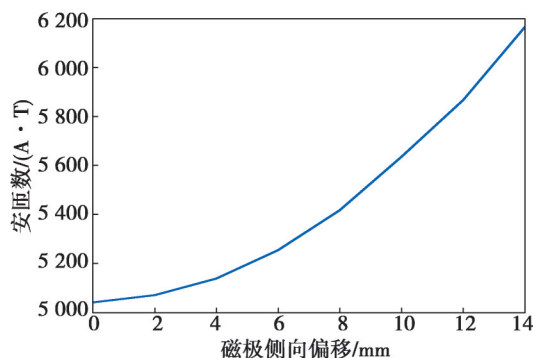


图6 侧移时安匝数和侧移量的关系

Fig. 6 Relationship between ampere-turns and lateral offset in lateral shift conditions

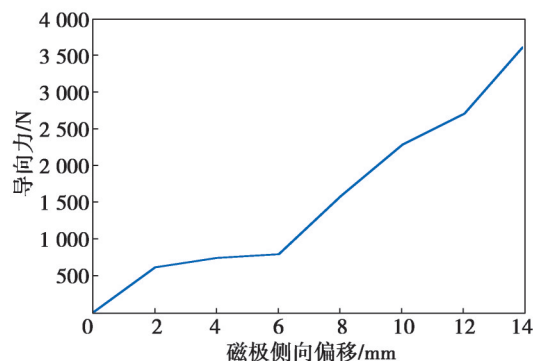


图7 侧移时导向力和侧移量的关系

Fig. 7 Relationship between guidance force and lateral offset in lateral shift conditions

结果表明,在磁极侧向偏移量为0~14 mm的范围内,所需励磁安匝数随偏移量的增大呈单调递增趋势,且增长速率逐渐加快。当偏移量为0 mm时,励磁安匝数约为5 030安匝;当偏移量增大至14 mm时,励磁安匝数提升至约6 180安匝,增幅约为22.9%。

在同一偏移范围内,导向力随偏移量呈单调递增趋势,且增长速率随偏移量增大而显著提升。当磁极侧向偏移为2 mm时,导向力约为600 N;偏移量增至6 mm时,导向力约为800 N;当偏移量达到14 mm时,导向力提升至约3 700 N。这说明电磁铁偏移越远,使其回到中心位置处的电磁力越大,车辆的导向性能与横向稳定性越强。

电磁铁侧移14 mm时,有限元仿真磁场分布如图8

所示。由图8可以看出, 电磁铁和轨道中的磁场强度分布较为均匀, 轨道中的磁感应强度较无偏移时有所减小。该工况下气隙磁感应强度分布不均, 且磁感线斜向延伸, 中间密集, 两边稀疏。

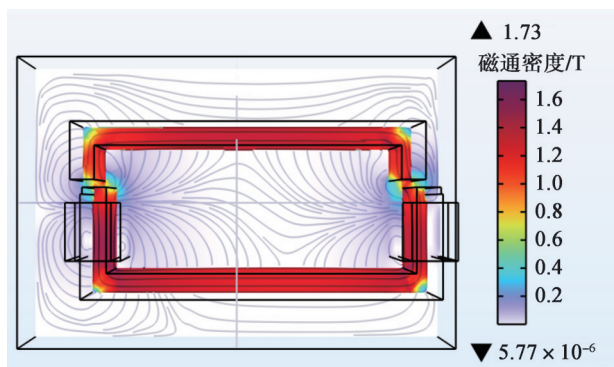


图8 电磁铁侧移14 mm三维有限元磁场分布

Fig. 8 Three-dimensional finite element magnetic field distribution of the electromagnet with 14 mm lateral offset

当列车行驶时, 悬浮电磁铁尚未抵达的U型轨区段不存在磁场; 待电磁铁运行至该处, U型轨便在悬浮磁场作用下被磁化, 由无磁状态转为有磁状态。这一磁化变化随着列车行进不断发生, 在悬浮电磁铁对应的U型轨位置会引发一定的涡流效应; 同时, 运动的电磁铁还会产生一定的磁漏现象。因此, 需对端部电磁铁在涡流效应下电磁力损失进行评估。图9为仿真得出的考虑涡流效应时, 电磁铁悬浮力损失随速度的变化曲线。

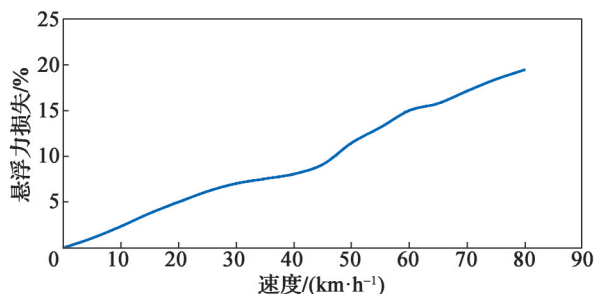


图9 悬浮力损失随电磁铁速度的变化

Fig. 9 Variation of levitation force loss with electromagnet speed

根据仿真结果可知, 悬浮力损失随着电磁铁移动速度的增大而增大。当列车运行速度达到80 km/h时, 单个电磁铁电磁力损失达到19.5%, 此时需要进一步增大控制电流, 以保障电磁力能够充分实现列车的无接触支撑。

3 结论

本文通过对小型化磁浮列车双线圈悬浮电磁铁建模, 仿真分析悬浮特性与导向特性, 得出以下结论:

① 通过对单悬浮电磁铁建立等效磁路模型, 经合理假设与公式推导, 明确了垂向电磁力与线圈匝数、输入电流、极板尺寸、悬浮间隙等参数的关联规律,

得出在电磁铁本体结构与材料适配现有轨道规范保持不变的前提下, 可通过调节线圈电流和悬浮间隙实现悬浮力动态调控的结论。

② 定量分析表明, 控制电流对悬浮力影响显著, 在31~39 A范围内电流提升可使悬浮力增加30%~40%, 且气隙越小、电流越大, 悬浮力受参数变化的影响越明显。

③ 三维有限元仿真结果揭示了该悬浮电磁铁的磁场分布特性。在额定工况下, Q235材质的铁芯与极板主体区域磁通密度未达到材料饱和阈值, 气隙中心处外侧磁通密度略高于内侧, 整体磁场分布均匀且具备良好的工程合理性。

④ 针对电磁铁的被动导向特性, 仿真验证了其悬浮-导向一体化功能的可行性, 在磁极侧向偏移0~14 mm范围内, 励磁安匝数随偏移量单调递增, 增幅达22.9%; 导向恢复力则随偏移量显著提升, 最大可达3 700 N; 在14 mm大偏移工况下, 电磁铁与轨道磁场仍保持均匀分布, 仅轨道磁通密度略有降低, 证明该电磁铁在横向偏移工况下具备稳定的磁学性能和导向能力。

⑤ 悬浮力损失与电磁铁运行速度呈正相关。当速度提升至80 km/h时, 单个电磁铁的悬浮力损失已达19.5%。为确保持续稳定的无接触支撑, 此时需相应提高控制电流, 以补偿该部分力的损失。

该新型双线圈悬浮电磁铁结构在保证悬浮、导向等性能的同时, 为直线电机预留了集成布置空间, 为磁浮交通电磁系统的悬浮-导向-牵引一体化设计提供理论依据, 能为中低速磁浮列车的小型化、轻量化发展提供参考。

参考文献:

- [1] 路志远. 中低速磁浮技术在城市轨道交通中的应用[J]. 中国战略新兴产业, 2018(4): 38.
LU Zhiyuan. Application of medium and low speed maglev technology in urban rail transit[J]. China strategic emerging industry, 2018(4): 38.
- [2] 马卫华, 罗世辉, 张敏, 等. 中低速磁浮车辆研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 199-216.
MA Weihua, LUO Shihui, ZHANG Min, et al. Research review on medium and low speed maglev vehicle[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(1): 199-216.
- [3] 翟婉明, 赵春发. 磁浮车辆/轨道系统动力学(I): 磁/轨相互作用及稳定性[J]. 机械工程学报, 2005, 41(7): 1-10.
ZHAI Wanming, ZHAO Chunfa. Dynamics of maglev vehicle/guideway systems(I): magnet/rail interaction and system stability[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2005, 41(7): 1-10.
- [4] 邓自刚, 刘宗鑫, 李海涛, 等. 磁悬浮列车发展现状与展望

- [J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 455-474.
- DENG Zigang, LIU Zongxin, LI Haitao, et al. Development status and prospect of maglev train[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2022, 57(3): 455-474.
- [5] 黄允凯, 周涛. 基于等效磁路法的轴向永磁电机效率优化设计[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 73-79.
- HUANG Yunkai, ZHOU Tao. Efficiency optimization design of axial flux permanent magnet machines using magnetic equivalent circuit[J]. Transactions of China electro-technical society, 2015, 30(2): 73-79.
- [6] HAN D K, CHANG J H. Design of electromagnetic linear actuator using the equivalent magnetic circuit method[J]. IEEE transactions on magnetics, 2016, 52(3): 7002104.
- [7] 尹力明, 陈贵荣. 吸力型磁悬浮列车的悬浮电磁铁的设计原理和计算方法[J]. 机车电传动, 1992(5): 14-19.
- YIN Liming, CHEN Guirong. The design principle & calculation method of levitation magnet for maglev vehicle of attraction type[J]. Electric drive for locomotives, 1992(5): 14-19.
- [8] 陈贵荣, 常文森, 尹力明. 磁悬浮列车悬浮电磁铁设计研究[J]. 国防科技大学学报, 1993(4): 10-15.
- CHEN Guirong, CHANG Wensen, YIN Liming. Study for designing the electromagnets of the maglev train[J]. Journal of national university of defense technology, 1993(4): 10-15.
- [9] 刘清辉, 马卫华, 单磊, 等. 基于试验数据的中低速磁浮列车电磁铁结构参数分析[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(6): 232-243.
- LIU Qinghui, MA Weihua, SHAN Lei, et al. Analysis of electromagnet structure parameters of medium and low speed maglev train based on test data[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2023, 23(6): 232-243.
- [10] 刘清辉, 单磊, 马卫华, 等. 考虑剩磁作用的中低速磁浮电磁力分析[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(4): 863-869.
- LIU Qinghui, SHAN Lei, MA Weihua, et al. Electromagnetic force analysis of medium-low-speed maglev considering remanence[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2023, 58(4): 863-869.
- [11] 李云强, 林国斌, 廖志明. 中低速磁浮列车U形电磁铁的电磁力特性分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(8): 52-57.
- LI Yunqiang, LIN Guobin, LIAO Zhiming. Analysis on the electromagnetic properties of U-magnet in medium-low speed maglev train[J]. Railway standard design, 2019, 63(8): 52-57.
- [12] 范屹立, 罗世辉, 张敏, 等. 铁芯高度对悬浮电磁铁性能影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(12): 3102-3109.
- FAN Yili, LUO Shihui, ZHANG Min, et al. Research on the influence of core height on performance of suspension electromagnet[J]. Journal of railway science and engineering, 2019, 16(12): 3102-3109.
- [13] 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, 29(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, 29(6): 40-43.
- [14] 倪鸿雁, 刘少克. 磁悬浮列车悬浮电磁铁电磁场三维有限元分析[J]. 铁道机车车辆, 2005, 25(5): 40-42.
- NI Hongyan, LIU Shaoke. Finite element analysis on 3D electromagnetic field of suspension magnet of maglev train[J]. Railway locomotive & car, 2005, 25(5): 40-42.
- [15] 倪鸿雁. 中低速磁浮列车悬浮电磁铁的电特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- NI Hongyan. Research on electromagnetic characteristics of suspension electromagnet of medium and low speed maglev train[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [16] 刘少克, 倪鸿雁, 张葵葵. 中低速磁悬浮列车悬浮电磁铁线圈电感计算[J]. 机车电传动, 2008(1): 45-47.
- LIU Shaoke, NI Hongyan, ZHANG Kuikui. Inductance calculation for suspension electromagnet coil of mid-to-low speed maglev train[J]. Electric drive for locomotives, 2008(1): 45-47.
- [17] 李海涛. 中低速磁浮列车悬浮电磁铁电磁特性研究与优化[J]. 新型工业化, 2021, 11(1): 62-64.
- LI Haitao. Research and optimization on electromagnetic characteristics of suspension electromagnet in medium and low speed maglev train[J]. The journal of new industrialization, 2021, 11(1): 62-64.
- [18] 杨成洪, 吴晓, 何更旺, 等. 中低速磁浮列车悬浮磁铁特性研究[J]. 机械设计与制造, 2021(3): 1-5.
- YANG Chenghong, WU Xiao, HE Gengwang, et al. Study on performance of the mid-low speed maglev train suspension magnet[J]. Machinery design & manufacture, 2021(3): 1-5.
- [19] 薛齐豪, 刘放, 梁成, 等. 磁悬浮列车悬浮电磁铁结构优化方法研究[J]. 机械设计与制造, 2020(5): 202-205.
- XUE Qihao, LIU Fang, LIANG Cheng, et al. Research on suspension electromagnet structure and optimization method[J]. Machinery design & manufacture, 2020(5): 202-205.
- [20] 吴谦. 中低速磁浮列车电磁铁涡流效应及悬浮力补偿方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- WU Qian. Research on eddy current effect of electromagnet and levitation force compensation method of medium-low speed maglev train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [21] 刘雨霏, 左飞飞, 张敏, 等. 新型中低速磁浮车辆动力学特性分析[J]. 机车电传动, 2024(1): 64-70.
- LIU Yufei, ZUO Feifei, ZHANG Min, et al. Analysis on dynamics characteristics of a newly mid-low speed maglev train model[J]. Electric drive for locomotives, 2024(1): 64-70.
- [22] 王滢, 刘方麟, 刘世杰, 等. 中低速磁浮列车速度对悬浮力

- 影响分析[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(4): 792-798.
- WANG Ying, LIU Fanglin, LIU Shijie, et al. Influence of speed on levitation force of medium-low-speed maglev train[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2023, 58(4): 792-798.
- [23] 田文静. 两种典型中低速磁浮列车悬浮电磁铁电磁特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- TIAN Wenjing. Research on electromagnetic characteristics of two typical suspension electromagnets for medium and low speed maglev train[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [24] BORCHERTS R, DAVIS L. Lift and drag forces for the attractive electromagnetic suspension systems[J]. IEEE transactions on magnetics, 1974, 10(3): 425-428.
- [25] 赵园, 何云凤, 郝宋, 等. 中低速磁悬浮列车端部电磁铁优化设计[J]. 微特电机, 2024, 52(12): 33-36.
- ZHAO Yuan, HE Yunfeng, HAO Song, et al. Optimization design of the end electromagnet module for the mid-low speed maglev train[J]. Small & special electrical machines, 2024, 52(12): 33-36.

Structural and performance analysis of compact dual-coil levitation electromagnets for maglev trains

LIU Pudong¹, XU Junqi^{1,2}, CHEN Chen^{1,2}, SU Zhixuan³, DOU Qingshan³

(1. College of Transportation, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. National Maglev Transportation Engineering R&D Center, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3. Hunan Rail Transit Technology Application Research Center Co., Ltd., Changsha, Hunan 410027, China)

Abstract: To support the downsizing and lightweighting requirements of medium- and low-speed maglev trains and integrated development of train levitation, guidance and traction functions, this study investigates a compact levitation electromagnet structure with pole plates wrapped by two coils, and systematically assesses its electromagnetic characteristics, levitation performance and passive guidance capability via an equivalent magnetic circuit method and finite element simulations. Firstly, an equivalent magnetic circuit model was established to simulate a single electromagnet, and the computational formula for the vertical electromagnetic force was derived under reasonable assumptions, to clarify the influence patterns of parameters including coil turns, input current and levitation gap on the electromagnetic force. Subsequently, core parameters were determined accounting for existing track dimension specifications, and the variation characteristics of levitation force with levitation gap and control current were quantitatively analyzed. Finally, a three-dimensional finite element model was constructed in COMSOL software to examine the magnetic field distribution characteristics under rated operating conditions via simulations, and the variations of excitation ampere-turns and the characteristics of guidance restoring force with lateral pole offsets from 0 to 14 mm were analyzed. Results indicate that the control current strongly influences the levitation force; as the air gap decreases, the current increases and levitation force becomes more sensitive to parameter variations. Under rated operating conditions, the magnetic flux density in the main regions of the iron core and pole plates remains below the saturation threshold, and the magnetic induction intensity is uniformly distributed in the air gap, offering good engineering rationality. With lateral pole shifts, the excitation ampere-turns increase monotonically with offset, with a 22.9% growth at an offset of 14 mm; moreover, the magnetic field between the electromagnet and the track maintains uniform distribution even under large offset conditions. This novel dual-coil levitation electromagnet structure provides space for linear motor installation and supports the construction of a levitation-traction-guidance integrated electromagnetic system. The study results on its performance characteristics provide a theoretical basis and data support for the compact design of medium-low speed maglev trains.

Keywords: medium- and low-speed maglev train; levitation electromagnet; dual-coil structure; equivalent magnetic circuit method; finite element simulation; electromagnetic characteristics; passive guidance