

先进载运装备

车载超导磁体长度对电动悬浮 列车悬浮特性的影响

吴定鼎, 黄欢, 袁宇航, 郑珺, 蔡成标, 邓自刚

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 超导电动悬浮是磁浮技术的发展方向之一。为进一步研究超导电动悬浮系统的悬浮特性, 文章以山梨试验线超导电动悬浮列车为研究对象, 建立了单侧车载磁体-零磁通线圈的三维瞬态仿真模型。首先根据公布的测试数据验证了模型的准确性, 随后用该模型研究了超导磁体长度对列车悬浮力的影响, 最后分析了长度优化后的超导磁体在不同速度、不同垂向位移和不同横向位移下的悬浮力特性, 重点分析了悬浮力的波动情况。研究表明, 仿真结果与试验线公布的测试数据接近程度良好, 误差在10%以内, 验证了此仿真模型的准确性; 同时超导磁体的长度对列车的浮阻比影响很小, 悬浮力均值随超导磁体长度增加而线性增加; 悬浮力在线圈长度为1 110 mm时波动幅值和波动系数都最小; 速度越高, 悬浮力的波动系数越小, 在500 km/h时, 垂向位移和一定范围内的横向位移对悬浮力波动系数影响不大。本文研究成果可为电动悬浮车辆的动力学性能优化提供参考。

关键词: 超导电动悬浮; 超导磁体; 有限元分析; 电磁仿真; 悬浮力; 尺寸优化

中图分类号: U237; O436

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2022)04-0009-08

Effect of onboard superconducting magnet length on the levitation characteristics of electrodynamic levitation train

WU Dingding, HUANG Huan, YUAN Yuhang, ZHENG Jun, CAI Chengbiao, DENG Zigang

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Superconducting electrodynamic levitation represents one of the development trends of the maglev technology. Taking the superconducting electrodynamic levitation train running on the Yamanashi test line as the research object, this paper was aimed to further study the levitation characteristics of the superconducting electrodynamic levitation system. A three-dimensional transient simulation model of the single-side on-board magnet - zero-flux coil was established. Firstly, the accuracy of the model was verified according to the released test data, and then the effect of the superconducting magnet length on the levitation force of the train was studied with this model. Finally, the levitation force characteristics of the length-optimized superconducting magnet under different speeds, vertical displacements, and lateral displacements were analyzed, focusing on fluctuation of levitation force. The research results show that the simulation results are close to the released test data, with an error less than 10%, which verifies the accuracy of the simulation model. In addition, the length of the superconducting magnet has little effect on the lift/drag ratio of the train, and the mean value of the levitation force increases linearly with the increasing length of the superconducting magnet; when the coil length is 1 110 mm, the fluctuation amplitude and the fluctuation coefficient of the levitation force are the smallest. The higher the speed, the smaller the fluctuation coefficient of the

收稿日期: 2022-04-04; 修回日期: 2022-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52022086)

通信作者: 邓自刚 (1982—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事磁悬浮交通技术及应用方面的研究;

E-mail: deng@swjtu.cn

levitation force; at 500 km/h, the vertical displacement and the lateral displacement within a certain range have little effect on the fluctuation coefficient of the levitation force. The conclusions of this paper provide a reference for the optimization of the dynamic performance of electrodynamic levitation trains.

Keywords: superconducting electrodynamic levitation; superconducting magnet; finite element analysis; electromagnetic simulation; levitation force; size optimization

0 引言

在交通系统的发展中，速度是人类永恒的追求。如今，轮轨列车最高速度受轮轨关系限制，逐渐达到极限，而人们仍在探寻更高速度的地面交通工具。由于磁悬浮列车与轨道没有接触和摩擦、更易达到更高速度，因此被寄予厚望。目前主要的磁悬浮制式有电磁悬浮（Electromagnetic Levitation, EML）制式、电动悬浮（Electrodynamic Levitation, EDL）制式和超导钉扎悬浮（Superconducting Pinning Levitation, SPL）制式等。以L0系为代表的日本SCMaglev系列超导电动悬浮列车具有高速、稳定、悬浮间隙大和无需主动控制等特点，在2015年以603 km/h的速度创造了当时世界轨道交通的最高速度，引起了众多学者的研究兴趣。

目前，除拥有宫崎试验线和山梨试验线的日本可以开展超导电动悬浮的试验研究外，其他国家的学者对电动悬浮系统的研究多处于理论分析阶段。为了研究电动悬浮车辆的电磁特性，文献[1]基于动态电路理论，通过时空相关的互感计算零磁通线圈的感应电动势和车载磁体与零磁通线圈之间的电磁相互作用，再通过求解零磁通线圈的电阻-电感电路常微分方程来分析电动悬浮系统的电磁力特性。该方法计算效率高，但计算结果的准确性依赖于计算线圈互感的准确性。在动态电路理论的基础上，还可用经验公式、纽曼公式或有限元分析等方法计算线圈之间的互感^[2-4]。零磁通线圈的结构并不复杂，但难以将具有零磁通线圈的电动悬浮系统简化为二维模型进行有限元仿真。用三维有限元方法分析电动悬浮系统时多采用变形网格来赋予超导磁体位移，由于超导磁体位移较大，其计算速度较慢且容易造成仿真模型不收敛；或是用直接建模的方式构建“8”字形线圈的交叉连接部分，增加了非必要的模型细节。因此，文献[5-6]在COMSOL Multiphysics软件的“旋转机械，磁”物理场接口中，将有限元模型划分为固定组件和移动组件，为移动组件指定整体位移，避免了使用变形网格方法；同时，文献[5]和文献[7]在COMSOL Multiphysics软件中用“电路”模块构建了零磁通线圈的上下回路交叉连接电路，简化了几何模型。此外，为优化电动悬浮系统，文献[8]基于动态电路理论优化设计了超导线圈的尺寸，使超导磁体有更好的悬浮性能；文献[9]优化设计了超导线圈和零磁通线圈尺寸，提高了电动悬浮列车达到稳

定悬浮时的高度。文献[10]提出了一种分析电动悬浮系统的设计模型，分析了不同零磁通线圈极距与超导线圈极距之比对悬浮力、导向力及其波动性的影响。

关于电动悬浮系统核心部件优化设计的文献相对较少，而超导磁体是电动悬浮系统的核心部件之一，超导磁体的结构参数将决定电动悬浮列车的性能。本文将通过有限元分析模型研究超导电动悬浮系统的悬浮特性，为超导电动悬浮列车的设计提供参考依据。

1 原理及建模

1.1 系统结构与工作原理

具有零磁通线圈的超导电动悬浮系统的结构如图1所示，超导电动悬浮系统轨道侧壁安装了用于悬浮和导向的零磁通线圈，该线圈由上下线圈环路反向串联而成，也被称为“8”字形线圈。车载超导磁体安装在电动悬浮车辆转向架的两侧，是一组安装在低温容器内的超导线圈。目前在山梨试验线上运行的超导电动悬浮列车，其转向架每侧安装了4个超导磁体，磁极沿列车纵向交错布置。当车载超导磁体与“8”字形线圈之间存在纵向相对运动时，若超导磁体中心高度与“8”字形线圈中心高度一致，则因感应电动势正好抵消而使得上下线圈内没有电流；若运动的超导磁体向下偏离零磁通线圈的中心线，则零磁通线圈会在不相等的感应电动势下感应出电流，此时超导磁体磁场与零磁通线圈感应电流之间的电磁相互作用会使车辆悬浮起来；当车辆偏离轨道中心时，两侧零磁通线圈所

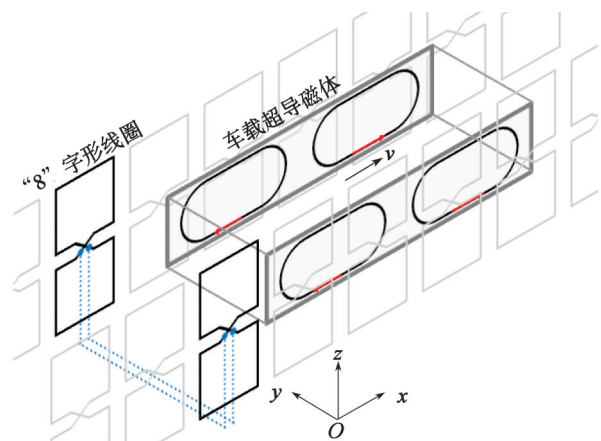


图1 超导电动悬浮系统的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of superconducting electrodynamic levitation

产生导向力的差异使得车辆受到指向轨道中心的合力而回到轨道中心。图1为带有交叉连线(图中虚线)的零磁通线圈系统, 交叉连线可以提供更好的导向稳定性, 且不影响悬浮力。

1.2 模型建立

以日本的SCMaglev 超导电动悬浮列车为研究对象, 根据电动悬浮的原理和文献[11-12]中公布的超导磁体和零磁通线圈的结构参数, 以文献[6]所描述的将仿真模型划分为固定域和移动域并用广义拉伸算子映射固定域和移动域相邻边界上的磁标势的建模方法为参考, 在COMSOL软件中建立了如图2所示的电动悬浮三维瞬态有限元仿真模型, 其主要结构参数如表1所示。考虑列车转向架一侧的超导磁体距轨道另一侧的零磁通线圈较远, 它们之间的电磁相互作用可以忽略不计, 且电动悬浮系统两侧对称, 而本文主要研究电动悬浮系统的悬浮力特性, 因此合理简化模型, 建立了不含交叉连线的半侧仿真模型, 模型中包含4个超导磁体和3组零磁通线圈。仿真模型主要由COMSOL软件中“AC/DC”模块的“旋转机械, 磁”物理场接口建立, 而该物理场接口使用磁矢势 A 和磁标势 V 作为因变量组合, 且常用于电动机和发动机的仿真。

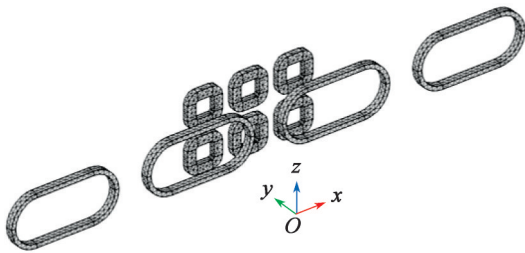


图2 超导电动悬浮仿真模型图

Fig. 2 Diagram of superconducting electrodynamic levitation simulation model

表1 超导电动悬浮仿真模型结构参数

Table 1 Structural parameters of superconducting electrodynamic levitation simulation model

零磁通线圈参数	数值	超导磁体参数	数值
长度/mm	350	长度/mm	1 070
高度/mm	340	圆周部分直径/mm	500
弯曲半径/mm	100	直线段部分长度/mm	570
导线线径/mm	11.3	匝数	1 400
匝数	24	磁动势/kA	700
上下环路中心距/mm	420	极距/mm	1 350
极距/mm	450	与零磁通线圈的中心距/mm	185

超导电动悬浮仿真模型示意图如图3所示, 该仿真模型主要由4个区域组成, 其中超导磁体设置在域②内, 零磁通线圈设置在域③内, 而域②与域③又分别设置在域①与域④内。域③和域④为固定网格域, 域①和域②为移动网格域, 仿真时通过定义域①、域②

的网格位移来模拟超导磁体的直线运动。

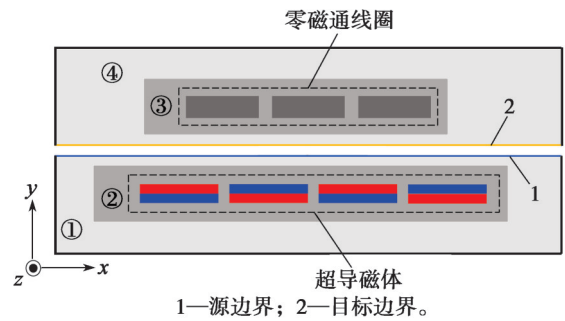


图3 超导电动悬浮仿真模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of superconducting electrodynamic levitation simulation model

仿真模型中, 超导磁体中施加的电流激励和零磁通线圈感应出的电流决定了磁感应强度的分布, 因此将超导磁体所在的域②和零磁通线圈所在的域③设置为以磁矢势 A 为因变量的磁矢势域, 其计算公式的麦克斯韦方程表示为:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3)$$

式中: A 为磁矢势, 作为方程的因变量; J 为电流密度; H 为磁场强度; E 为电场强度; B 为磁感应强度; t 为时间。

其控制方程可表示为

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times A) = 0 \quad (4)$$

式中: σ 为电导率; μ 为磁导率。

此外, 对于三维电磁场问题, 固定组件与移动组件之间的移动区域适合用磁标势 V 计算, 域①和域④被设定为磁标势域, 用磁标势作为因变量, 其控制方程为

$$\mathbf{H} = -\nabla V \quad (5)$$

式中: H 为磁场强度; V 为磁标势。

在磁矢势域与磁标势域的交界处, 由COMSOL软件“旋转机械, 磁”物理场接口自带的混合公式边界来完成磁矢势与磁标势的转换。在本文研究过程中, 发现磁矢势域的自由度多于磁标势域的自由度, 因此本文仅将线圈周围一小部分区域设置为磁矢势域以降低模型的自由度和计算难度。

利用广义拉伸算子将磁标势 V 从源边界1映射到目标边界2是解决大位移电磁仿真中电磁连续性问题关键。映射的坐标变换为

$$(x^i, y^i, z^i) \rightarrow \left(x - \left\lfloor \frac{x}{\tau} \right\rfloor \times \tau, y, z \right) \quad (6)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整函数; (x, y, z) 为源坐标; (x^i, y^i, z^i) 为映射目标坐标; τ 为域①和域④在 x 方向的长度。

磁标势域的剩余几个面是仿真模型的边界, 通常

可将其设置为磁绝缘边界或者无限元域。磁绝缘边界的特性是边界附近的磁力线与边界平行，这会扭曲边界附近的磁力线、改变磁场的自然分布，而本文仿真模型中的线圈离边界较近，设置磁绝缘边界可能会对结果造成影响，因此本文设置了可以模拟无限远空间的无限元域边界。

最后，模型中零磁通线圈的上下线圈通过 COMSOL 软件中“AC/DC”模块的“电路”物理场接口形成完整的零磁通线圈回路，这样可以避免对连接上下线圈的导线进行建模，降低了模型的复杂度。

模型中线圈的电磁力计算方法为

$$\mathbf{F} = \iiint_V (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV \quad (7)$$

式中： \mathbf{F} 为线圈受到的电磁力； V 为线圈体积。

为便于描述力的方向，以列车前进方向为 x 向或纵向，垂直于前进方向为 y 向或横向，垂直于水平面的方向为 z 向或垂向；纵向力对应磁阻力，横向力对应导向力，垂向力对应悬浮力。

由于超导磁体自身的磁场远大于零磁通线圈感应出的磁场，且同时存在网格本身的不对称性，直接计算超导磁体的电磁力会出现一个较大的初始值且难以消除，因此需要用零磁通线圈的电磁力来计算超导磁体的电磁力。文献[12]测试了山梨试验线上超导电动悬浮列车的悬浮特性，并给出了通过测试单个零磁通线圈受到的电磁力来间接计算超导磁体电磁力的方法：由于作用在超导磁体上的电磁力是所有作用在零磁通线圈上的电磁力的反作用力之和，所以作用在超导磁体上的电磁力为

$$F(t) = - \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(t+n\Delta t) \quad (8)$$

式中： $F(t)$ 为转向架一侧的超导磁体受到的电磁力； $f(t)$ 为零磁通线圈受到的电磁力； n 为线圈编号。

电动悬浮车辆在2个相邻零磁通线圈之间移动时受到电磁力的平均值为

$$\bar{F} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} F(t) dt = - \frac{1}{\Delta t} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) dt \quad (9)$$

式中： \bar{F} 为转向架一侧的超导磁体受到的电磁力的平均值； Δt 为2个相邻零磁通线圈之间移动所需时间。

通过式(8)和式(9)，仅需1组零磁通线圈就可以分析特定工况下超导磁体的受力情况，因此，本文的仿真模型设置了3组零磁通线圈，并用第2组零磁通线圈的电磁力数据来计算超导磁体的电磁力，这样既减小了模型的复杂程度和计算量，又在一定程度上考虑了相邻线圈之间的影响。同时，为了得到零磁通线圈完整的电磁力波形，模型中设置了转向架一侧完整的4个超导磁体。

在本文的仿真模型中，超导磁体做严格的匀速直线运动。以第2组零磁通线圈的中心为模型 x 轴原点，

则超导磁体的中心相对于第2组线圈的 x 轴相对坐标为

$$x = x_0 + vt \quad (10)$$

式中： x 为超导磁体相对位置坐标； x_0 为超导磁体初始相对位置坐标； v 为超导磁体的运行速度。

为更直观、统一地表现线圈力的变化情况，后续的图表中本文将用零磁通线圈与超导磁体的相对位置来代替时间。

2 模型验证

为检验该仿真模型的准确性，本文根据文献[12]中公布的山梨试验线试验列车实际测试数据（以下简称实测数据）来验证本文中的仿真模型。由于试验线路和列车的部分结构参数以及试验结果未公开，本节的验证结果仅作为模型准确性的参考。本文利用仿真模型和式(9)计算了超导磁体以150 km/h和300 km/h的速度运行时在0~60 mm垂向位移下的悬浮力，经3次样条插值后，换算为单转向架的总悬浮力，与实测数据中150 km/h和300 km/h时3组不同垂向位移下单转向架的总悬浮力进行对比，结果如图4所示。与实测数据相比，300 km/h时，3个垂向位移下的悬浮力的误差分别为2.27%、0.87%和0.58%；150 km/h时，3个垂向位移下的悬浮力的误差分别为9.62%、9.11%和9.37%。由于山梨试验线及试验列车的结构参数未完全公开，模型中零磁通线圈的部分结构参数是基于300 km/h的测试数据反选出来的，因此仿真模型计算出的结构与300 km/h的测试数据基本吻合；尽管在150 km/h速度下的测试数据误差偏大，但还是能够比较接近地体现出电动悬浮系统的悬浮特性。

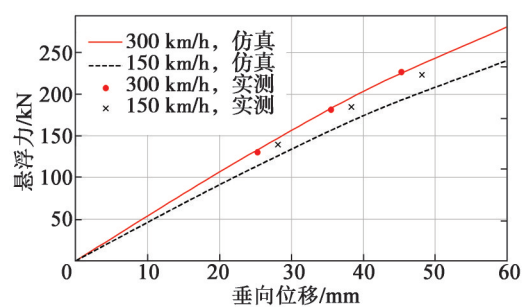


图4 关于垂向位移的悬浮力的仿真计算与实测数据对比

Fig. 4 Comparison between simulated calculation of levitation force as a function of vertical displacement and the measured data

文献[12]还给出了在150 km/h、200 km/h、250 km/h和300 km/h速度下测得的单侧超导磁体所受到的垂向力、横向力和纵向力。其中，垂向力在93.3 kN左右，由此可以推断测试时悬浮架每侧超导磁体承担的整车重力约为93.3 kN。由于文献并没有直接给出对应的超导磁体垂向位移，平衡状态零磁通线圈受到的横向力和纵向力由以下步骤获得：首先用本文中的仿真模型

分别计算速度为 150 km/h、200 km/h、250 km/h、300 km/h、400 km/h 和 500 km/h, 垂向位移范围为 0~60 mm 时零磁通线圈受到的垂向力, 利用式(9)计算出单侧超导磁体受到的悬浮力, 经 3 次样条插值后得到不同速度下悬浮力随垂向位移变化的曲线; 其次求解出在这些速度下平衡状态 (垂向力为 93.3 kN) 时对应的垂向位移, 分别为 43.5 mm、39.6 mm、37.4 mm、36.3 mm、35.1 mm 和 34.5 mm; 最后用此垂向位移在仿真模型中计算对应工况下的横向力和纵向力。计算结果与实测数据的对比如图 5 所示。计算出的横向力与实测数据在 4 个速度下的误差分别为 2.09%、0.56%、1.80% 和 9.72%, 计算出的纵向力与实测数据在 4 个速度下的误差分别为 3.29%、3.53%、2.02% 和 9.44%。150 km/h、200 km/h 和 250 km/h 时的横向力和纵向力与测试数据是基本一致的, 300 km/h 时误差稍大, 造成这一结果最有可能的原因是测试数据本身在 300 km/h 时偏大。文献[12]中提到 300 km/h 左右时零磁通线圈的垂向力波形叠加了部分固有频率波动, 这意味着此时零磁通线圈或超导磁体可能出现了共振, 共振有可能使测量结果偏大。

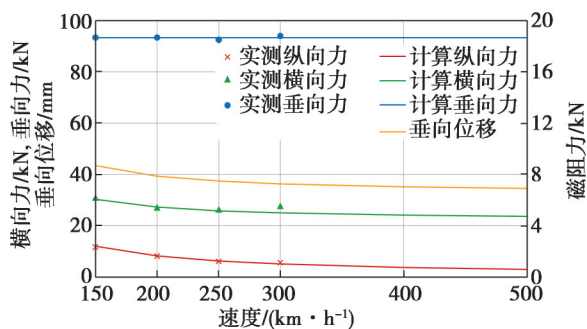


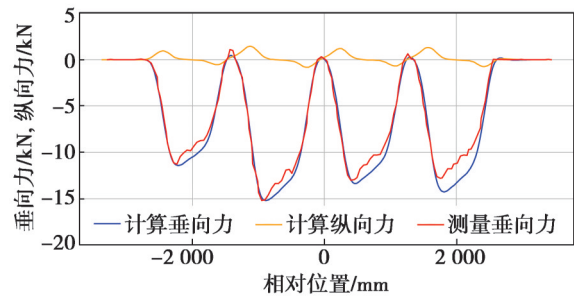
图5 关于速度的三向力的仿真计算与实测数据对比

Fig. 5 Comparison between the simulated calculation of three-axis force as a function of speed and the measured data

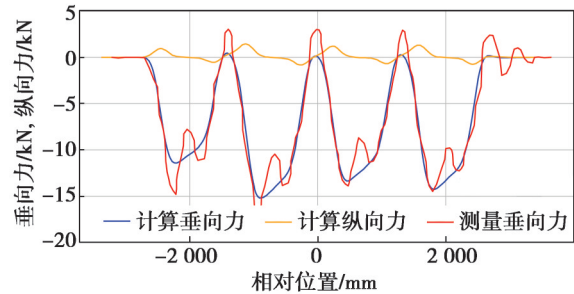
最后, 在电动悬浮列车速度为 150 km/h 和 300 km/h 时的平衡状态下, 将零磁通线圈所受垂向力随超导磁体位移变化的波形与实测数据^[12]中列车地面悬浮导向线圈所受垂向力的波形进行比较, 同时将零磁通线圈所受纵向力的波形进行比较, 其相关情况如图 6 所示。从图 6 可以看到, 4 个超导磁体依次驶过零磁通线圈, 产生了 4 个波峰, 每个波峰的大小略有不同, 但变化规律相同。每个波峰都是先迅速上升, 然后转变为缓慢减小, 再转变为迅速减小。仿真模型体现出上述 4 个波峰及 3 个过程, 并与实测数据的幅值较为吻合, 但仿真只模拟了简单的匀速直线运动, 因此未能体现出在速度为 300 km/h 时因零磁通线圈共振而产生的力波动。

综上所述, 本文仿真模型计算出的悬浮特性与山梨试验线上电动悬浮列车的悬浮特性接近, 误差在 10% 以内, 仿真模型具有较高的准确性, 可以用于研

究超导电动悬浮。



(a) 150 km/h 时的垂向力和纵向力波形



(b) 300 km/h 时的垂向力和纵向力波形

图 6 作用在零磁通线圈上的垂向力和纵向力波形

Fig. 6 Waveform of vertical and longitudinal force acting on null-flux coil

3 超导磁体长度优化

3.1 超导磁体长度对浮阻比和悬浮力的影响

从图 6 可以看出, 在每个波峰中, 零磁通线圈所受垂向力迅速增大时, 零磁通线圈对超导磁体产生阻力, 对应超导磁体接近零磁通线圈的过程; 零磁通线圈所受垂向力迅速减小时, 零磁通线圈对超导磁体产生推力, 对应超导磁体远离零磁通线圈的过程; 而在零磁通线圈所受垂向力缓慢减小的阶段, 超导磁体几乎不受阻力和推力, 此时超导磁体的直线部分正对零磁通线圈。由此推断, 适当增加超导磁体直线部分长度可以延长垂向力对超导磁体直线部分的作用时间, 充分利用感应电流, 进而有可能提高悬浮力以及浮阻比。

为了研究悬浮力与超导磁体长度之间的关系, 以表 1 中的结构参数为基础, 通过改变超导磁体直线部分的长度来改变超导磁体的长度。使用本文中的仿真模型分别计算了长度为 720~1 220 mm、步长变化为 50 mm 的超导磁体在速度为 500 km/h、垂向位移为 45 mm 的工况下运行时, 第 2 组零磁通线圈的垂向力波形, 并利用式(8)计算得到了如图 7 所示的具有不同超导磁体长度的转向架单侧超导磁体悬浮力波形。日本的超导电动悬浮列车是采用长定子三相同步直线电机, 安装于地面的定子线圈 (推进线圈) 其极距为 900 mm^[13]。超导磁体作为同步电机的动子, 其磁极为 N 级、S 级交替排布, 则其极距应为 $(900 \text{ mm} \times 3) / 2 = 1\,350 \text{ mm}$ 不变,

否则将无法发挥出同步电机的全部性能。因超导磁体长度应小于极距,同时需给线圈的支架或容器留出空间,所以将超导磁体的长度限制在了1 220 mm以内。

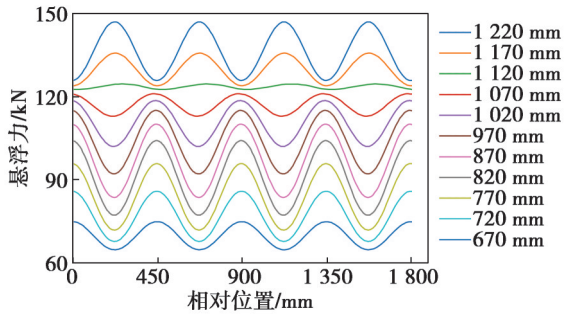


图7 不同长度超导磁体的悬浮力波形

Fig. 7 Levitation force waveforms of superconducting magnets with different lengths

由图7可知,在不同线圈长度下,悬浮力以近似正弦波的方式波动,波长约为450 mm,即1个零磁通线圈极距的长度,且悬浮力的平均值随着线圈长度的增加而增加。此外,不同线圈长度下悬浮力的波动大小不同,在1 120 mm时悬浮力的波动最小,这表明超导磁体的长度对悬浮力的波动性是有影响的。为便于分析悬浮力波形,将仿真获得的悬浮力波形曲线按式(11)拟合。

$$F_L(x) = A_0 + A_1 \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_{GC}}x + \phi\right) \quad (11)$$

式中: $F_L(x)$ 为拟合的超导磁体悬浮力; x 为超导磁体相对位置坐标; A_0 为悬浮力的平均值; A_1 为悬浮力的波动幅值; τ_{GC} 为零磁通线圈的极距, $\tau_{GC}=450$ mm; ϕ 为悬浮力波动的相位。

按式(11)拟合悬浮力会忽略掉悬浮力更高频率的谐波分量,但是这些高频谐波分量相对较小,不影响本文的结论。实际计算中,通过式(11)得到的悬浮力平均值 A_0 与通过式(9)得到的悬浮力平均值 \bar{F}_L 非常接近。为衡量悬浮力的波动性以及悬浮力与磁阻力的相对大小,定义悬浮力的波动幅值 A_1 与悬浮力的平均值 A_0 之比为悬浮力的波动系数,悬浮力平均值 \bar{F}_L 与磁阻力平均值 \bar{F}_D 之比为浮阻比。

为确认在1 120 mm附近是否存在使悬浮力波动最小的超导磁体长度,进一步仿真计算了长度从1 080 mm到1 210 mm、步长变化为10 mm的不同超导磁体在速度为500 km/h、垂向位移为45 mm时的悬浮力曲线。如图8所示为超导磁体的浮阻比、悬浮力及其波动系数与超导磁体长度变化的关系曲线,其中悬浮力波形的最大值与最小值以误差棒的形式给出。由图8可知,超导磁体长度对浮阻比的影响不大,超导磁体的浮阻比均在122.5左右。悬浮力与超导磁体长度近似呈线性关系,经线性拟合后得出,在速度为500 km/h和垂向位移为45 mm时,超导磁体直线部分的长度每增

加10 mm,车载磁体的平均悬浮力提高约1.33 kN;再根据拟合的结果推测,在超导磁体长度为500 mm时,车载磁体的悬浮力均值约为41.2 kN,此时原本为跑道形的超导磁体线圈没有了直线部分而变成一个圆形。

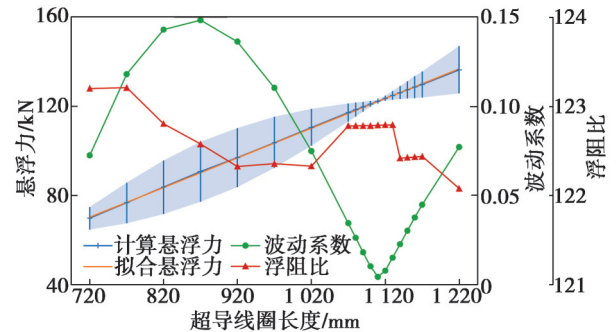


图8 超导磁体长度对悬浮性能的影响

Fig. 8 Effect of superconducting magnet length on levitation characteristics

从悬浮力波动随超导磁体长度的变化来看,超导磁体直线部分的长度从720 mm到1 220 mm变化时,悬浮力的波动系数和波动幅值呈现出先增大、再减小、最后再继续增大的变化规律。当超导磁体线圈长度为870 mm时,悬浮力的波动幅值达到最大,为13.5 kN,此时悬浮力波动系数为14.8%;当线圈长度为1 110 mm时,悬浮力的波动幅值最小,为0.553 kN,此时悬浮力波动系数为0.451%;当线圈长度从1 110 mm到1 220 mm变化时,悬浮力的波动幅值又继续增大。作为对比,山梨试验线上电动悬浮列车的超导磁体长度为1 070 mm,此时悬浮力波动幅值为4.06 kN,悬浮力波动系数为3.47%。

图8表明,在超导磁体的极距等其他结构参数不变的情况下,超导电动悬浮存在一个使悬浮力波动最小的超导磁体长度,在本文的案例中,该长度在1 110 mm左右。这说明可以通过优化超导磁体长度来减小电动悬浮车辆的悬浮力波动,从而从根本上减小电动悬浮车辆的振动、优化电动悬浮车辆的动力学平稳性。但是仅此1个工况无法确定这一结论对其他工况的普适性。因此,本文进一步探讨了速度、垂向位移和横向位移对悬浮力波动的影响。

3.2 其他因素对悬浮力波动的影响

为确认该结论,本文将1 110 mm作为超导磁体长度优化后的结果,其余结构参数不变,如表1所示,以速度500 km/h、垂向位移40 mm以及无横向位移为基本工况,进一步计算转向架单侧的车载超导磁体在不同速度、不同垂向位移和不同横向位移下的悬浮力及其波动情况。

优化后的超导磁体在不同速度下的悬浮力及其波动情况如图9所示,计算的速度为50 km/h到500 km/h。由图9可知,随着速度的提高,悬浮力也相应提高,在高速段时其提高速度放缓,逐渐饱和;与悬浮力变化

情况相反, 悬浮力的波动幅值随着速度的提高而不断减小, 在高速段时其减小速度放缓。两者的共同作用使得悬浮力的波动系数也随速度提高而减小, 当速度大于 250 km/h 时, 悬浮力的波动系数小于 1%。这是因为随着车辆速度的提高, 零磁通线圈中的磁通变化率和感应电动势增大, 感应电流随之增加, 使得悬浮力不断增加。但感应电动势可以看作是一系列谐波的叠加, 随着列车速度的进一步提高, 这些谐波的频率也逐渐增加。随着频率的提高, 零磁通线圈的集肤效应更加明显, 增加了线圈的有效电阻, 且零磁通线圈对这些高频谐波的感抗增加, 零磁通线圈总的电抗也随之增加, 最终使得线圈中的感应电流及悬浮力在高速段难以提高。同时, 零磁通线圈对感应电动势中频率较高的谐波分量的阻抗增大, 使得悬浮力的波动幅值减小, 这也证明了超导电动悬浮具有适合高速工况的优势。

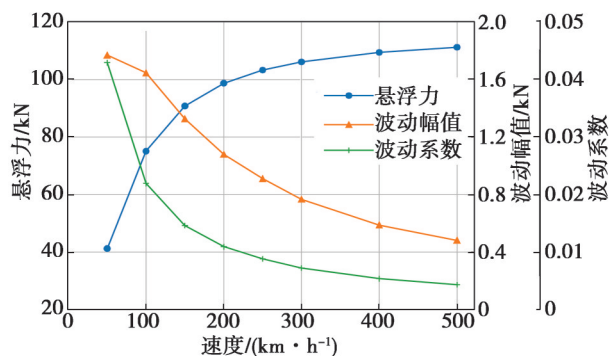


图9 悬浮力及其波动与速度的关系
Fig. 9 Relationship of levitation force and its fluctuation with speed

优化后的超导磁体在不同垂向位移下的悬浮力及其波动情况如图 10 所示, 计算的垂向位移为 10 mm 到 60 mm。由图 10 可知, 随着垂向位移的增大, 悬浮力及其波动幅值随之增大, 但悬浮力的波动系数维持在 0.44% 左右, 变化很小。这是因为随着垂向位移增大, 零磁通线圈上下环路中的磁通变化率差异增大, 在零磁通线圈中产生了更大的感应电动势, 使线圈中的电流和产生的悬浮力增大。但在速度不变的情况下, 悬

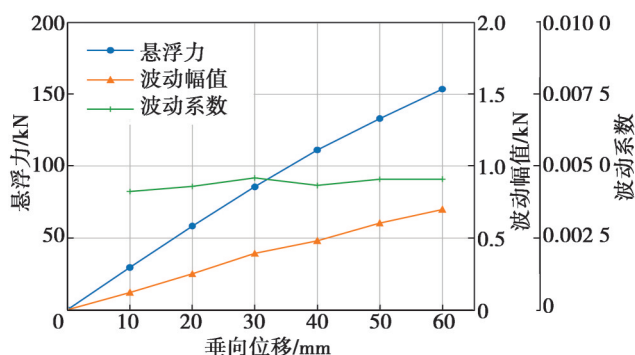


图10 悬浮力及其波动与垂向位移的关系
Fig. 10 Relationship of levitation force and its fluctuation with vertical displacement

浮力及其波动幅值均成比例提高, 因此随着垂向位移增大, 悬浮力的波动系数变化很小。

优化后的超导磁体在不同横向位移下的悬浮力及其波动情况如图 11 所示, 计算的横向位移为 -40 mm 到 40 mm, 横向位移越大则越靠近零磁通线圈。由图 11 可知, 随着横向位移的增大, 超导磁体与零磁通线圈的间距减小, 超导磁体的悬浮力和悬浮力波动幅值均增大, 这是超导磁体靠近零磁通线圈后线圈中的磁通变化率增大、感应电流增大而产生的结果。在 -40 mm 到 40 mm 这一横向位移范围内, 悬浮力的波动系数略有变化, 但都在 0.8% 以内。需要说明的是, 发生横向位移时, 为使车辆平衡, 两侧超导磁体的垂向位移会不一致, 具体结果有待进一步分析。

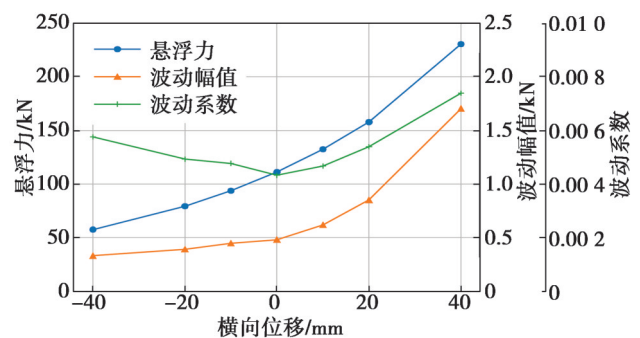


图11 悬浮力及其波动与横向位移的关系
Fig. 11 Relationship between levitation force and its fluctuation with lateral displacement

综合上述分析来看, 长度为 1 110 mm 的超导磁体, 其悬浮力波动较小, 波动性受速度影响明显, 在高速时有着更小的波动系数, 在一定范围内受垂向位移和横向位移影响较小。这个结论对优化超导电动悬浮列车的平稳性和舒适性将有很大的帮助。

4 结论

作为目前唯一实现在速度 600 km/h 以上开展载人试验的磁悬浮制式, 超导电动悬浮制式的优势是运行速度快、悬浮能力强、悬浮间隙大、自稳定性好以及不需要额外控制, 具有广阔的应用前景。为了研究超导磁体对电动悬浮车辆悬浮力的影响, 基于电磁学理论建立了相关 COMSOL 三维瞬态仿真模型, 通过仿真计算模型得出以下结论:

① 本文建立的有限元仿真模型计算的结果与实测数据接近程度高, 相对误差在 10% 以内; 悬浮力的波形与测试数据较为吻合。本文中的仿真模型可为分析、设计电动悬浮系统提供参考。

② 超导磁体长度对超导电动悬浮系统的浮阻比影响较小, 超导电动悬浮的悬浮力随超导磁体的长度线性增加, 悬浮力波动系数随线圈长度变化, 当线圈长度为 1 110 mm 时, 悬浮力波动幅值和波动系数最小。

③当超导磁体长度为 1 110 mm 时, 其悬浮力波动受速度影响较大, 受垂向位移和横向位移影响较小。在垂向位移为 40 mm 时, 当速度大于 250 km/h 时, 其悬浮力波动系数小于 1%, 这有利于优化超导电动悬浮车辆的动力学性能。

④研究内容是围绕山梨试验线超导电动悬浮列车车载超导磁体的线圈长度展开的, 可以通过有限元仿真找到使悬浮力波动最小的线圈长度数据。但超导电动悬浮车辆的分析设计对象不只是线圈长度, 设计目标不只是悬浮力及其波动性, 还需研究其他参数对超导电动悬浮车辆悬浮性能的影响以及这些参数是如何影响电动悬浮车辆悬浮性能的, 为设计电动悬浮车辆系统提供更多指导。

参考文献:

- [1] HE Jianliang, ROTE D M, COFFEY H T. Applications of the dynamic circuit theory to maglev suspension systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(6): 4153-4164.
- [2] LIM J, LEE C Y, OH Y J, et al. Equivalent inductance model for the design analysis of electrodynamic suspension coils for hyperloop[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 23499.
- [3] CAI Yao, MA Guangtong, WANG Yiyu, et al. Semianalytical calculation of superconducting electrodynamic suspension train using figure-eight-shaped ground coil[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(5): 3602509.
- [4] 龚夕霞, 卢琴芬. 超导电动悬浮系统基于有限元-解析耦合算法的力特性分析[J]. 微电机, 2020, 53(9): 1-7.
GONG Xixia, LU Qinfen. Force performance analysis of superconducting EDS system by finite element-analytical coupling algorithm[J]. Micromotors, 2020, 53(9): 1-7.
- [5] CHEN Dachun, LI Xiaofen, HUANG Xiangyu, et al. An FEM model for evaluation of force performance of high-temperature superconducting null-flux electrodynamic maglev system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(7): 3603806.
- [6] HUANG Huan, DENG Zigang, LI Haitao, et al. Numerical simulation of dynamic electromagnetic characteristics of superconducting electrodynamic suspension (EDS) train[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(5): 3601105.
- [7] GONG Tianyong, MA Guangtong, WANG Ruichen, et al. 3-D FEM modeling of the superconducting EDS train with cross-connected figure-eight-shaped suspension coils[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(3): 3600213.
- [8] GONG Tianyong, MA Guangtong, LI Jing, et al. Design optimization of high temperature superconducting magnets and null-flux coils for electrodynamic suspension train[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(1): 526-536.
- [9] GONG Xixia, LU Qinfen, LI Yanxin. Multi-objective optimization for the levitation system of the electrodynamic suspension train with HTS magnets[C]//IEEE. 2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA). Wuhan: IEEE, 2021.
- [10] LIM J, LEE C Y, LEE J H, et al. Design model of null-flux coil electrodynamic suspension for the hyperloop[J]. Energies, 2020, 13(19): 5075.
- [11] 土島秀雄, 寺井元昭. 550 km/hを達成した山梨リニア実験線車両の超電導磁石システム[J]. 低温工学, 1998, 33(10): 656-664.
TSUCHISHIMA H, TERAJI M. The superconducting magnet system for maglev vehicles in 550 km/h operation on the Yamanashi test line[J]. Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan, 1998, 33(10): 656-664.
- [12] FUJIMOTO T, AIBA M, SUZIKI 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): 63-67.
- [13] 村井敏昭. 推進・浮上・案内を兼用するリニア同期モータの特性[J]. 電気学会論文誌D(産業応用部門誌), 1994, 114(7/8): 746-752.
MURAI T. Characteristics of LSM combined propulsion, levitation and guidance[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 114(7/8): 746-752.