



超导电动悬浮系统地面悬浮线圈 参数优化研究

于青松, 于森, 李凯, 杨晶, 邵南
(中车长春轨道客车股份有限公司 磁浮研究所, 吉林 长春 130062)

摘要: 针对超导电动悬浮(SC-EDS)系统中地面悬浮线圈的参数优化问题, 文章建立了一种电磁力解析计算模型, 采用日本文献中的试验数据验证了模型的有效性, 并基于该模型系统研究了不同悬浮线圈参数对电磁力的影响。结果表明, 当悬浮线圈长度为400 mm时, 可获得最大的峰值悬浮力和最小的磁阻力, 且在列车发生横移时能提供最大的导向力; 悬浮线圈采用“下大上小”的结构方案有助于提高峰值悬浮力, 而在横移工况下, 减小悬浮线圈宽度及上下线圈间隙均可增大导向力; 增大悬浮线圈的截面积能够提升峰值悬浮力、降低磁阻力, 同时增强横移时的导向能力。该文研究成果可为悬浮线圈的参数优化提供理论依据, 也可为后续动力学计算提供数据支撑。

关键词: 电动悬浮; 悬浮线圈; 电磁力; 解析计算; 优化

中图分类号: U237

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)02-0035-07

0 引言

目前高速磁浮交通制式主要包括超导电动悬浮、常导电磁悬浮和超导钉扎悬浮3种。其中超导电动悬浮系统无须主动控制, 悬浮间隙大, 可达100 mm以上^[1-2], 在高速运行场景下更具优势。研究超导电动悬浮技术的国家主要有日本、美国、韩国和中国。美国最早提出电动悬浮车辆的概念, 并于1975年研制成功轨道长度为115 m的缩比超导电动悬浮模型车。日本自1970年左右开始超导电动悬浮列车的工程化研究, 1972年建造了第一辆电动悬浮原理车ML100, 1991年开工建设山梨高速磁浮试验线, 并于1997年投入试运行, 实现了550 km/h的不载人试验。此后近30年间, 日本持续开展试验验证, 分别于2003年和2015年实现了581 km/h的载人行驶最高速度和603 km/h的地面交通最高试验速度^[3], 目前已进入准商业运营阶段。韩国于2009年开始布局亚音速管道列车HyperTube, 并建

成缩比尺寸试验线, 开展超导磁体及推进电机性能测试。国内关于超导电动悬浮研究的牵头单位主要有中车长春轨道客车股份有限公司(中车长客)和中国航天科工集团第三研究院(航天三院)。中车长客于2023年实现了国内首套高温超导电动悬浮全要素试验系统的悬浮运行, 2024年完成第一阶段的超导电动高速磁浮工程样车, 并于2025年在第十七届中国国际现代化铁路技术装备展览会上首次公开亮相该样车。

超导电动悬浮系统的工作原理是车载超导线圈与地面悬浮线圈发生电磁作用, 从而产生悬浮力和导向力。一旦线圈的结构尺寸确定, 车辆与地面线圈相互作用产生的电磁力大小便随之确定。因此, 深入掌握系统的电磁耦合关系, 进而合理设计线圈的结构尺寸, 显得尤为重要。针对超导电动悬浮系统的电磁力计算, 国内外学者开展了大量研究。文献[4]基于动态电路理论推导了电磁力计算公式, 系统分析了电动悬浮列车的运行特性。文献[5]采用边界元法和拉普拉斯变换, 对三维电磁力进行了解析计算。文献[6]建立了电动悬

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFF0508000); 上海市科技计划项目(25DZ3008300)

第一作者: 于青松, 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事超导电动悬浮车辆技术研究; E-mail: yuqingsong.ck@crrecg.cc

通信作者: 于森, 男, 主要从事超导电动悬浮列车电磁特性方面的研究; E-mail: yumiao13844827303@163.com

引用格式: 于青松, 于森, 李凯, 等. 超导电动悬浮系统地面悬浮线圈参数优化研究[J]. 机车电传动, 2026(2): 35-41.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.004.

Citation: YU Qingsong, YU Miao, LI Kai, et al. Parameter optimization for ground suspension coils in SC-EDS systems[J]. Electric drive for locomotives, 2026(2): 35-41.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.004.

浮电磁力计算模型,将地面线圈简化为二维结构,提高了模型的计算效率。文献[7-12]建立了车载超导磁体与地面悬浮线圈的“场-路-运动”耦合模型,揭示了地面线圈是否交叉连线、车速、超导磁体相对悬浮线圈的下沉量以及列车横向偏移等因素对电磁力的影响规律。文献[13]研究了车载超导磁体长度对电动悬浮列车悬浮特性的影响。目前,超导电动悬浮系统电磁力的计算方法主要分为基于动态电路理论的数值计算方法和基于有限元的数值模拟方法两类。有限元模型在计算较长轨道时需耗费大量时间,而动态电路模型可在保证计算精度的前提下,快速求解悬浮系统的稳态和瞬态性能,显著提高计算效率,因此更适用于参数优化分析。

本文采用上下串联反接的“8”字形结构悬浮线圈形式,结合动态电路理论和虚功原理,建立了超导电动悬浮系统的电磁力解析计算模型,并依据文献[14]中的数据进行对比并验证了模型的有效性。以中车长客采用的极距为 1 500 mm 的车载超导磁体为对象,在日本悬浮线圈尺寸基础上,分别以峰值悬浮力、导向力及浮阻比(悬浮力与磁阻力之比)为评价指标,对悬浮线圈参数进行优化,获得最优参数组合。在此基础上,基于优化得到的悬浮线圈参数,开展超导电动悬浮系统的电磁力计算。

1 超导电动悬浮系统电磁力计算模型

本文通过建立超导与悬浮线圈的数学模型,在傅里叶空间求解磁感应强度以获取线圈自感和互感,进而求解动态电路方程获得感应电流,并基于虚功原理计算电磁力,形成完整的电磁-力耦合分析流程。

1.1 互感计算

对于两线圈间互感的求解,常用方法包括采用有限元法和采用纽曼公式。然而,采用有限元法计算耗时较长,采用纽曼公式难以确定合适的积分路径,且需要离散化较多坐标点。为此,本文采用互感定义式直接计算互感,如式(1)。

$$M = \psi_{21} / I_1 \quad (1)$$

式中: M 为互感; ψ_{21} 为磁链; I_1 为电流。

在求解磁链时,首先计算磁感应强度,再通过积分求得磁通。需要说明的是,本文通过构造尺寸相同的磁感应强度和面积矩阵,并对其进行点乘运算实现积分。对于磁感应强度的求解,文献[15]在傅里叶空间中采用了毕奥萨伐尔定律,其计算表达式如式(2)所示。

$$b_y = i(\mu_0 d/2) e^{-\sqrt{k_x^2 + k_z^2} y} \cdot \left(\frac{k_z}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} j_x(k_x, k_z) - \frac{k_x}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} j_z(k_x, k_z) \right) \quad (2)$$

式中: b_y 为磁感应强度; i 为虚数单位; μ_0 为真空磁导

率; d 为线圈厚度; x 为列车前进方向; y 为列车横向; z 为列车垂向; k_x 、 k_z 分别为 x 、 z 方向的空间频率; j_x 、 j_z 分别为 x 、 z 方向电流密度的傅里叶变换。

在傅里叶空间中求解磁场后,通过傅里叶逆变换得到真实空间的磁场分布。

1.2 电流计算

地面悬浮线圈经左右侧连线后,可产生增强的导向力,有利于车辆运行的稳定性。本文基于左右连线电路模型对电流进行求解,每组悬浮线圈的等效电路图如图 1 所示。

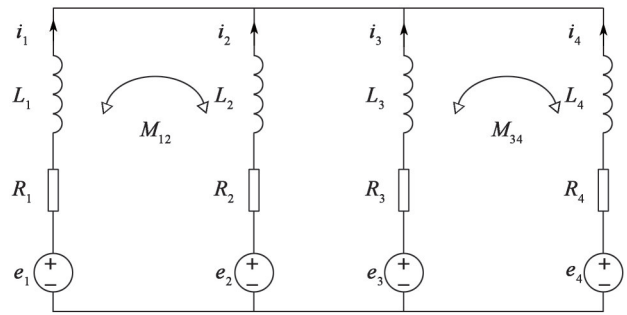


图 1 连线悬浮线圈等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of levitation coil connection

图 1 中, R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 分别表示一侧上半悬浮线圈和下半悬浮线圈的电阻以及另一侧上半悬浮线圈和下半悬浮线圈的电阻, $R_1=R_2=R_3=R_4$; L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 分别表示一侧上半悬浮线圈和下半悬浮线圈的自感以及另一侧上半悬浮线圈和下半悬浮线圈的自感, $L_1=L_2=L_3=L_4$; i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 分别表示一侧上半悬浮线圈和下半悬浮线圈的电流以及另一侧上半悬浮线圈和下半悬浮线圈的电流; M_{12} 表示一侧上下半悬浮线圈间的互感; M_{34} 代表表示另一侧上下半悬浮线圈的互感。

对于多组悬浮线圈电流采用如下公式求解:

$$-L\dot{I} + V_i = v_x G_x I + RI \quad (3)$$

$$A\dot{I} = \dot{I}_n \quad (4)$$

式中: L 为自互感矩阵; $\dot{I}$ 为所有线圈电流变化率; V_i 为所有线圈端电压; v_x 为车速; G_x 为列车前进方向上超导线圈和半悬浮线圈间的互感梯度; R 为所有半悬浮线圈及超导线圈的电阻; A 为矩阵; $\dot{I}_n$ 为每组悬浮线圈电流变化率。

其中,每组悬浮线圈的 4 个半线圈端电压相等, 4 个半线圈的电流变化率之和为 0, 超导线圈的端电压为 0。

1.3 电磁力计算

一个悬浮架上的电磁力由两侧悬浮线圈共同提供,如式(5)~式(7)所示。其中, F_x 为电磁阻力, F_y 为导向力, F_z 为悬浮力。式中第一项为一侧 m 个超导线圈与 $2n$ 个半悬浮线圈产生的电磁力,第二项为另一侧 m 个

超导线圈与 $2n$ 个半悬浮线圈产生的电磁力。

$$F_x = \sum_{i=1}^{2n} \sum_{j=1}^m I_i I_{sj} \frac{\partial M_{sji}}{\partial x} + \sum_{i=2n+1}^{4n} \sum_{j=m+1}^{2m} I_i I_{sj} \frac{\partial M_{sji}}{\partial x}$$

(5)

$$F_y = \sum_{i=1}^{2n} \sum_{j=1}^m I_i I_{sj} \frac{\partial M_{sji}}{\partial y} + \sum_{i=2n+1}^{4n} \sum_{j=m+1}^{2m} I_i I_{sj} \frac{\partial M_{sji}}{\partial y}$$

(6)

$$F_z = \sum_{i=1}^{2n} \sum_{j=1}^m I_i I_{sj} \frac{\partial M_{sji}}{\partial z} + \sum_{i=2n+1}^{4n} \sum_{j=m+1}^{2m} I_i I_{sj} \frac{\partial M_{sji}}{\partial z}$$

(7)

2 地面悬浮线圈参数优化

2.1 模型验证

本文采用文献[14]中的数据对电磁力计算模型进行验证, 所使用的车载超导线圈和地面悬浮线圈参数如表1所示。

表1 线圈参数

Table 1 Parameters of coil

线圈	参数项目	参数值
超导线圈	长/mm	1 070
	宽/mm	500
	直线边/mm	570
	极距/mm	1 350
	磁动势/kA	700
悬浮线圈	长/mm	350
	宽/mm	340
	垂向线圈间距/mm	420
	线圈间距/mm	450
	距超导线圈距离/mm	185

在速度为100 km/h和500 km/h条件下, 一个悬浮线圈周期内的平均悬浮力(以下简称平均悬浮力)随超导线圈中心线相对于悬浮线圈中心线下沉量(以下简称下沉量)的变化曲线与文献的对比结果如图2所示, 平衡下沉量及浮阻比随车速的变化规律如图3所示。从图2、图3可以看出, 本文模型计算值与参考文献结果的变化规律一致, 数值基本吻合, 从而验证了本文计算模型的正确性。

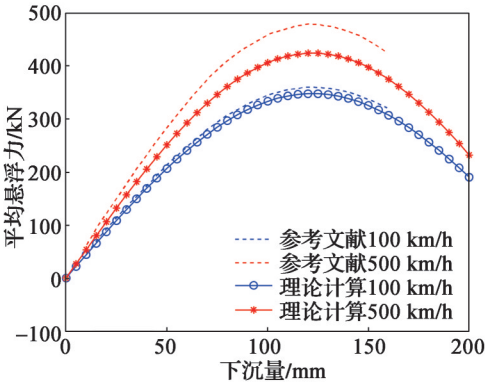


图2 平均悬浮力随下沉量的变化曲线
Fig. 2 Variation curve of average suspension force with subsidence

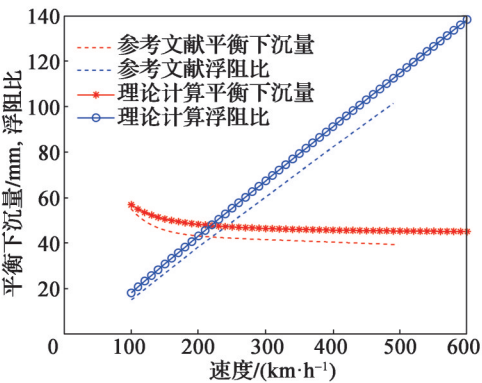


图3 平衡下沉量和浮阻比随速度的变化曲线
Fig. 3 Variation curve of balanced subsidence/suspension-resistance ratio with speed

2.2 地面悬浮线圈参数优化

针对中车长客的1 500 mm极距超导磁体, 开展地面悬浮线圈参数优化, 超导线圈参数如表2所示。

表2 超导线圈参数

Table 2 Parameters of superconducting coil

线圈	参数项目	参数值
超导线圈	长/mm	1 070
	宽/mm	500
	直线边/mm	570
	极距/mm	1 500
	磁动势/kA	750

以表1中日本悬浮线圈参数为基础, 确定悬浮线圈长度的最优值。悬浮线圈长度的取值范围为350~400 mm, 其中350 mm为日本悬浮线圈长度, 考虑到实际工程安装时相邻线圈间需留有一定空隙, 因此最大长度取400 mm。车速为600 km/h时, 不同悬浮线圈长度下的平均悬浮力随下沉量的变化规律如图4所示, 随着悬浮线圈长度的增加, 平均悬浮力增大, 线圈长度为400 mm时可提供更大的峰值悬浮力, 从而为列车悬浮运行提供更大的安全裕度。

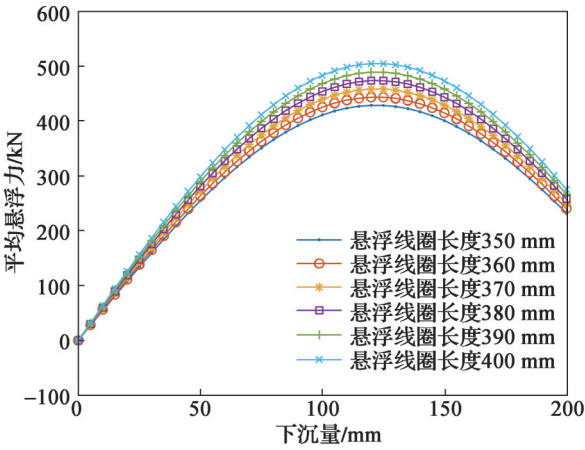


图4 不同悬浮线圈长度下平均悬浮力随下沉量变化曲线
Fig. 4 Variation curve of average suspension force with subsidence for different suspension coil lengths

依据文献中单个悬浮架受力 230 kN 的条件, 求取不同悬浮线圈长度下的平衡下沉量, 具体为在不同长度参数下进行计算, 得到悬浮架电磁力为 230 kN 时对应的下沉量: 长度 350~400 mm 间 6 组数据对应的下沉量分别为 -44.5 mm、-42.9 mm、-41.4 mm、-40 mm、-38.7 mm、-37.5 mm。针对各平衡下沉量, 进一步计算平均导向力和磁阻力随列车横向偏移 (以下简称横移) 的变化。车速为 600 km/h 时, 不同悬浮线圈长度下平均导向力随横移的变化规律如图 5 所示, 随着线圈长度增加, 平均导向力增大, 长度 400 mm 时能在横移发生时提供更大的平均导向力, 即更大的导向刚度, 有利于列车回正。

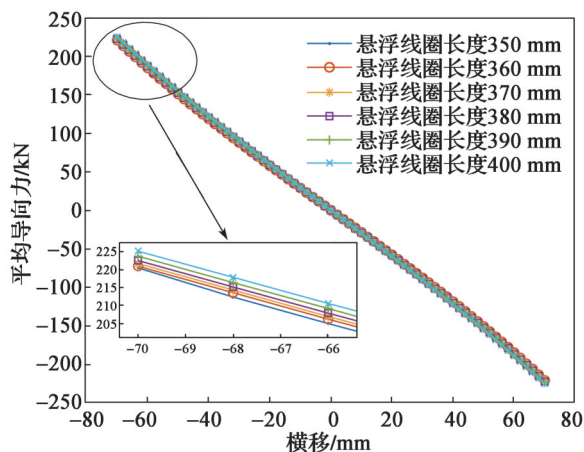


图 5 不同悬浮线圈长度下平均导向力随横移变化曲线

Fig. 5 Variation curve of average guidance force with lateral displacement for different suspension coil lengths

不同悬浮线圈长度下的浮阻比随横移的变化规律如图 6 所示, 随着线圈长度增加, 浮阻比增大, 长度 400 mm 时可获得更大的浮阻比, 意味着产生更小的电磁阻力, 从而减少牵引所需电能。因此, 本文将悬浮线圈长度确定为 400 mm。

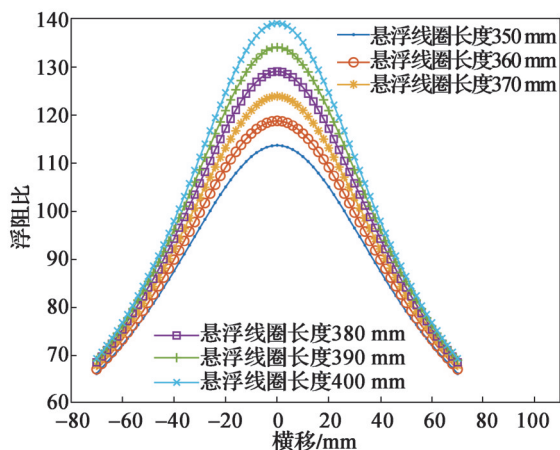


图 6 不同悬浮线圈长度下浮阻比随横移变化规律

Fig. 6 Variation curve of suspension-resistance ratio with lateral displacement for different suspension coil lengths

由于悬浮线圈截面积参数与外轮廓参数的影响相互独立, 本文先以日本线圈的截面积参数对悬浮线圈

上下间隙和宽度进行优化, 后续再优化截面积参数。串联反接后, 上下悬浮线圈的总宽度保持 760 mm 不变, 上悬浮线圈下部外边缘至下悬浮线圈上部外边缘之间的间隙 split (以下称上下间隙) 分别取 10 mm、20 mm、30 mm。除每种上下间隙对应取上下悬浮线圈等宽工况外, 还计算了下悬浮线圈宽度分别为 350 mm、360 mm、370 mm、380 mm 时的电磁力。为便于展示, 本文截取部分工况绘图, 车速为 600 km/h、向右横移 5 mm 时, 平均悬浮力随下沉量的变化规律如图 7 所示。下大上小的悬浮线圈方案可获得更大的峰值悬浮力, 且随上下间隙及下悬浮线圈宽度的增加, 峰值悬浮力逐渐增大。上下间隙 30 mm、下悬浮线圈宽度 370 mm 方案的最大峰值悬浮力可达 560 kN, 而上下间隙 10 mm、悬浮线圈宽度 350 mm 方案的最小峰值悬浮力为 490 kN。

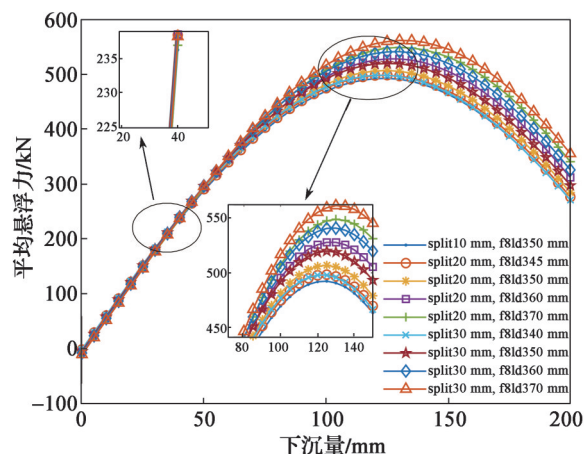


图 7 不同悬浮线圈外轮廓下平均悬浮力随下沉量变化规律

Fig. 7 Variation curve of average suspension force with subsidence for different suspension coil outer contours

在起浮速度 150 km/h 的工况下, 上下间隙 30 mm、下悬浮线圈宽度 370 mm 方案的最大峰值悬浮力可达 480 kN, 而上下间隙 10 mm、悬浮线圈宽度 350 mm 方案的最小峰值悬浮力为 420 kN, 因篇幅所限, 此处不作具体展示。对于文献中单个悬浮架受力 230 kN 对应的平衡下沉量 (均为相对于上下间隙中心), 各方案无明显区别。

针对每种方案对应的平衡下沉量, 计算平均导向力和浮阻比随横移的变化规律, 结果如图 8 和图 9 所示。相同横移时, 下悬浮线圈宽度越小、上下间隙越小, 所能提供的平均导向力越大。以横移 -15 mm 为例, 上下间隙 10 mm、悬浮线圈宽度 350 mm 方案的平均导向力最大, 为 50.4 kN; 上下间隙 30 mm、下悬浮线圈宽度 370 mm 方案的平均导向力最小, 为 38.3 kN, 前者较后者提升约 31.6%。相同横移时, 下悬浮线圈宽度越大, 浮阻比越大, 但体现在磁阻力上的差异非常小。因此, 本文最终选择上下间隙 10 mm、悬浮线圈宽度 350 mm 方案。

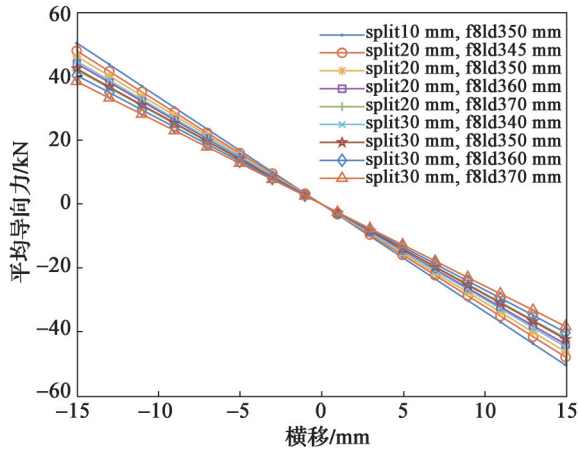


图8 不同悬浮线圈外轮廓下平均导向力随横移变化规律

Fig. 8 Variation curve of average guidance force with lateral displacement for different suspension coil outer contours

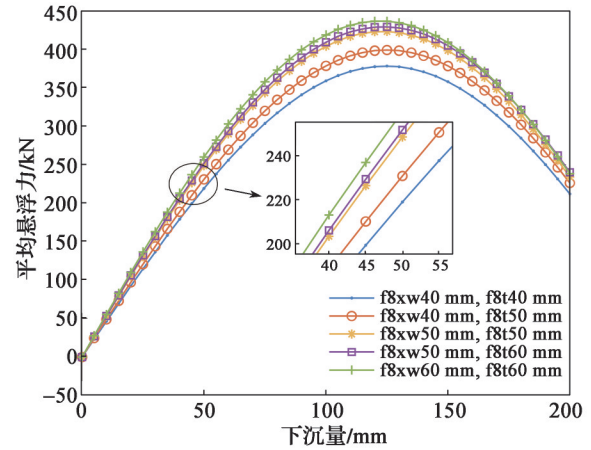


图10 不同悬浮线圈截面积下平均悬浮力随下沉量变化曲线

Fig. 10 Variation curve of average suspension force with subsidence for different suspension coil sectional areas

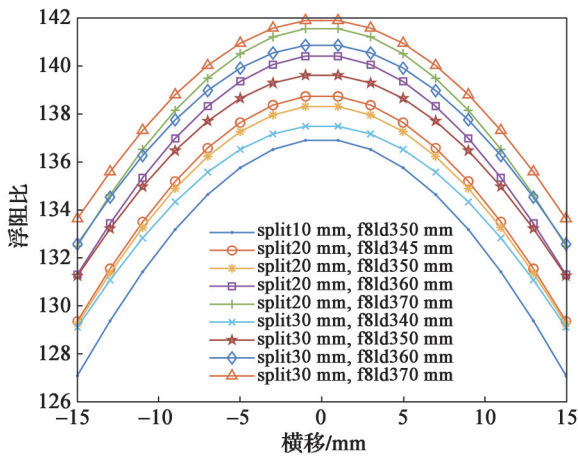


图9 不同悬浮线圈外轮廓下浮阻比随横移变化规律

Fig. 9 Variation curve of suspension-resistance ratio with lateral displacement for different suspension coil outer contours

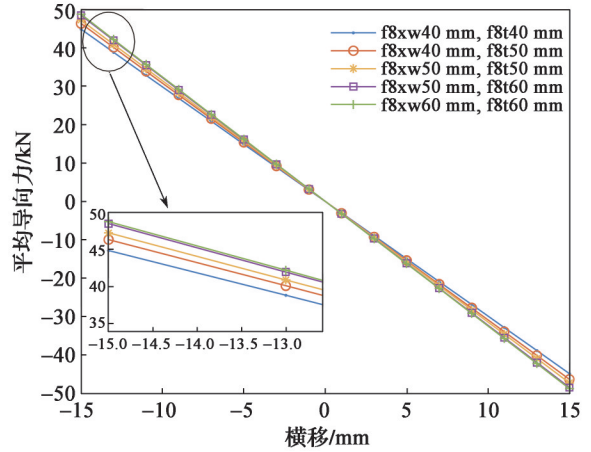


图11 不同悬浮线圈截面积下平均导向力随横移变化曲线

Fig. 11 Variation curve of average guidance force with lateral displacement for different suspension coil sectional areas

在悬浮线圈外轮廓参数优化的基础上, 本文对截面积参数进行优化, 截面积参数包括悬浮线圈厚度 $f8t$ (以下简称厚度) 和悬浮线圈绕组宽度 $f8xw$ (以下简称绕组宽度), 需说明的是, 悬浮线圈内径变化对电磁力影响很小, 本文不作更改计算。厚度取值为 40 mm、50 mm、60 mm, 绕组宽度 $f8t$ 取值为 40 mm、50 mm、60 mm。在不同截面积参数工况的计算中, 每种工况下超导线圈表面与悬浮线圈表面之间的距离均为 125 mm。截面积参数的改变主要影响电阻, 且在低速工况下受电阻变化影响显著。车速为 150 km/h、向右横移 5 mm 时, 平均悬浮力随下沉量的变化规律如图 10 所示。

随着悬浮线圈截面积的增大, 峰值悬浮力逐渐增大、单个悬浮架受力 230 kN 对应的平衡下沉量逐渐减小。在各方案对应的平衡下沉量时, 计算平均导向力和浮阻比随横移的变化规律, 结果如图 11 和图 12 所示。悬浮线圈截面积越大, 横移时的平均导向力越大, 浮阻比也逐渐增大, 在成本可控的前提下, 优先选择截面积较大的悬浮线圈。因此, 本文选择绕组宽度 60 mm、厚度 60 mm 的截面积参数。

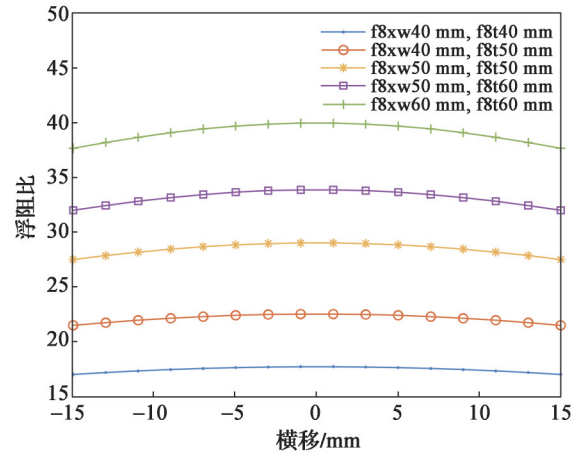


图12 不同悬浮线圈截面积下浮阻比随横移变化曲线

Fig. 12 Variation curve of suspension-resistance ratio with lateral displacement for different suspension coil sectional areas

3 超导电动悬浮列车电磁力计算

本文基于优化后的地面悬浮线圈参数, 对超导电动悬浮列车的电磁力进行计算。以单个悬浮架受力 230

kN 为条件, 计算不同车速对应的平衡下沉量, 结果如图 13 所示。由于悬浮力恒为 230 kN, 随着车速提高, 平衡下沉量逐渐减小。

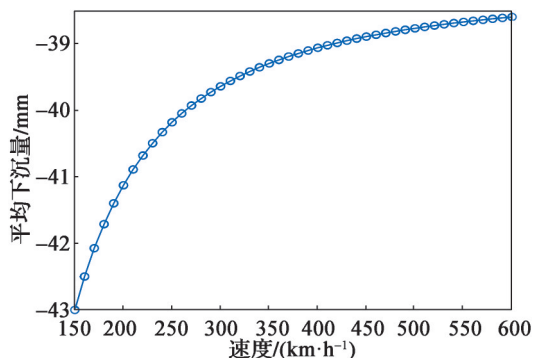


图 13 平衡下沉量随车速变化曲线

Fig. 13 Variation curve of balanced subsidence with train speed

在不同车速对应的平衡下沉量时, 计算悬浮架两侧的导向力。无横移时, 悬浮架两侧导向力随车速变化规律如图 14 所示。本文规定向左为正方向, 由图 14 可知, 悬浮架右侧导向力方向向左, 左侧导向力方向向右; 同一车速下, 两侧导向力大小相等、方向相反, 导向力的合力始终为零。

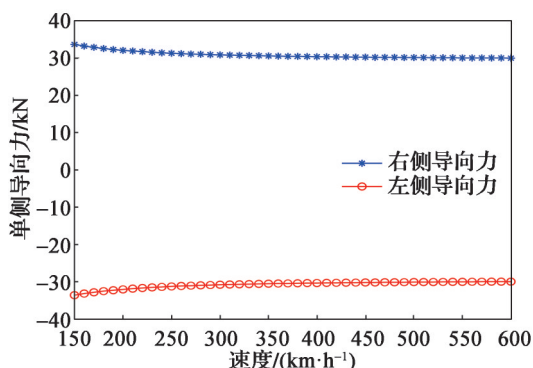


图 14 悬浮架两侧导向力随车速变化曲线

Fig. 14 Variation curve of guidance force on two sides of levitation bogie with train speed

在不同车速对应的平衡下沉量时计算磁阻力。无横移时, 悬浮架磁阻力随车速的变化规律如图 15 所示。随着车速增加, 磁阻力逐渐减小; 当车速达到 600 km/h

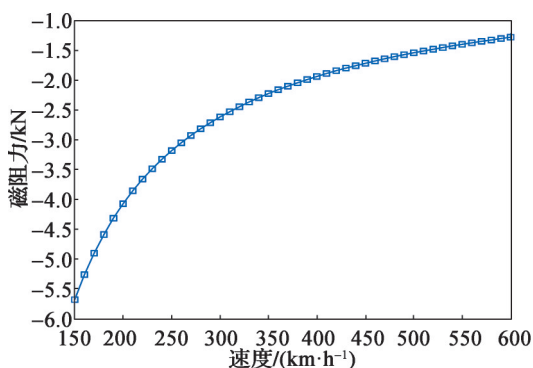


图 15 悬浮架磁阻力随车速变化曲线

Fig. 15 Variation curve of reluctance force on levitation bogie with train speed

时, 单个悬浮架上的磁阻力为 1.3 kN。

对不同车速下平衡下沉量、导向力及磁阻力的计算结果进行分析, 验证了地面悬浮线圈参数的优化设计合理; 同时, 对悬浮架上电磁力的定量分析结果可为相关部件设计及动力学分析提供输入。

4 结论

为了对极距 1 500 mm 的车载超导磁体进行地面悬浮线圈参数优化, 本文建立了超导电动悬浮系统电磁力解析计算模型, 并通过日本文献数据验证了模型的有效性。在此基础上, 依次开展了线圈长度、外轮廓参数及截面积参数的优化, 最后基于优化参数计算了列车平衡下沉量、导向力及磁阻力, 得到以下结论:

①随着地面悬浮线圈长度的增加, 峰值悬浮力、导向力及浮阻比逐渐增大; 相同车重下平衡下沉量减小, 列车发生横移时可提供更大的导向力, 运行时磁阻力减小。

②下大上小的地面悬浮线圈方案可提供更大的峰值悬浮力, 且峰值悬浮力随上下间隙和下悬浮线圈宽度的增加而增大; 列车发生横移时, 下悬浮线圈宽度和上下间隙越小, 提供的导向力越大。

③随着悬浮线圈截面积的增大, 峰值悬浮力、导向力和浮阻比逐渐增大, 在线圈成本可控的前提下, 优先选择截面积较大的悬浮线圈。

参考文献:

- [1] 马光同, 杨文姣, 王志涛, 等. 超导磁浮交通研究进展[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 68-74.
MA Guangtong, YANG Wenjiao, WANG Zhitao, et al. Research development of superconducting maglev transportation[J]. Journal of south China university of technology (natural science edition), 2019, 47(7): 68-74.
- [2] 刘士菟, 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] 蓝建中. 日本超导磁浮列车时速创纪录[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(5): 134.
LAN Jianzhong. Japan's superconducting electrodynamic maglev train reaches record speed[J]. Urban mass transit, 2015, 18(5): 134.
- [4] HE J L, 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.
- [5] DAVEY K. Analysis of an electrodynamic maglev system [J]. IEEE transactions on magnetics, 1999, 35(5): 4259-4267.
- [6] 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.
- [7] 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): 22-25.
- WAN Shangjun, QIAN Jinggen, NI Guangzheng, et al. Study of the levitation and guidance technology for electrodynamic suspension maglev vehicle[J]. *Proceedings of the Chinese society for electrical engineering*, 2000, 20(9): 22-25.
- [8] 王伟, 卢琴芬. 高速超导磁浮列车悬浮系统电磁力解析模型与结构优化研究[J]. *微特电机*, 2025, 53(4): 1-9.
- WANG Wei, LU Qinfen. Investigation of electromagnetic force analytical model and structure optimization of suspension system in high-speed superconducting suspension train [J]. *Small & special electrical machines*, 2025, 53(4): 1-9.
- [9] 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.
- [10] 黄欢, 李海涛, 祝翰林, 等. 基于傅里叶级数方法的超导电动磁浮半解析电磁模型及刚度特性分析[J]. *机械工程学报*, 2025, 61(14): 261-272.
- HUANG Huan, LI Haitao, ZHU Hanlin, et al. Semi-analytical electromagnetic model and stiffness characteristics of superconducting electrodynamic suspension based on the Fourier series method[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2025, 61(14): 261-272.
- [11] 王小农, 黄靖宇. 超导电动磁浮列车悬浮和导向特性[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(10): 1482-1489.
- WANG Xiaonong, HUANG Jingyu. Levitation and guidance characteristics of superconducting electrodynamic maglev train[J]. *Journal of Tongji university(natural science)*, 2022, 50(10): 1482-1489.
- [12] 王小农, 黄靖宇. 超导电动磁浮列车电磁特性及悬浮稳定性控制[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(8): 1261-1269.
- WANG Xiaonong, HUANG Jingyu. Electromagnetic characteristics and levitation stability control of superconducting electrodynamic maglev train[J]. *Journal of Tongji university (natural science)*, 2024, 52(8): 1261-1269.
- [13] 吴定鼎, 黄欢, 袁宇航, 等. 车载超导磁体长度对电动悬浮列车悬浮特性的影响[J]. *机车电传动*, 2022(4): 9-16.
- WU Dingding, HUANG Huan, YUAN Yuhang, et al. Effect of onboard superconducting magnet length on the levitation characteristics of electrodynamic levitation train[J]. *Electric drive for locomotives*, 2022(4): 9-16.
- [14] 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.
- TOSHIAKI Murai. Characteristics of LSM combined propulsion, levitation and guidance[J]. *IEEE transactions on industry applications*, 1994, 114(7/8): 746-752.
- [15] ROTH B J, SEPULVEDA N G, WIKSWO J P. Using a magnetometer to image a two-dimensional current distribution[J]. *Journal of applied physics*, 1989, 65(1): 361-372.

Parameter optimization for ground suspension coils in SC-EDS systems

YU Qingsong, YU Miao, LI Kai, YANG Jing, SHAO Nan

(Maglev Research Institute, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: To optimize parameters of ground suspension coils in superconducting electrodynamic suspension (SC-EDS) systems, an analytical calculation model for electromagnetic force was established in this study. The effectiveness of the model was verified using experimental data from Japanese literature. Based on this model, the influence of suspension coil parameter variations on the electromagnetic force was systematically investigated. Results show that when the suspension coils are 400 mm long, the peak suspension force is maximized and the reluctance force is minimized, and the maximum guidance force is provided when the train undergoes lateral displacement. A coil geometry with a larger bottom and smaller top helps to increase the peak suspension force. Under lateral displacement conditions, the guidance force is increased by reducing either the suspension coil width or the coil clearance. Increasing the cross-sectional area of the suspension coil contributes to increasing the peak suspension force, reducing the reluctance force, and improving the guidance capability against lateral displacement. These findings provide a theoretical basis for optimizing suspension coil parameters and offer data support for future dynamic calculation.

Keywords: electrodynamic suspension (EDS); suspension coil; electromagnetic force; analytical calculation; optimization