DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.125

超导电动悬浮试验线悬浮系统设计及验证

谭富星[1]，李　凯[1]，于　淼[1]，王爱彬[1]，杨　晶[1]，李小汾[2]
（1.中车长春轨道客车股份有限公司 磁浮研究所，吉林 长春 130062；
2.上海交通大学 电气工程系，上海 200240）

摘　要：超导电动悬浮是一种面向高速、超高速运行的磁浮交通制式。在超导电动悬浮系统线圈结构和电磁参数设计确定后，其悬浮力和导向力的变化规律无法通过车载控制器进行调整，因此线圈的尺寸设计至关重要。文章从工程角度出发阐述分析可行的电动悬浮系统设计方法：基于动态电路方程和虚功原理，计算某一参数条件下的平均悬浮力峰值，结合制造工艺与成本获得悬浮线圈结构参数；随后计算该尺寸“8”字形线圈尺寸与超导磁极的作用关系，获得车重与平均悬浮力相等时的偏移量，即悬浮系统稳态工作的平衡位置，并得到“8”字形线圈尺寸对平均悬浮力的峰值影响规律：在其他变量保持不变时，半线圈高度对平均悬浮力峰值具有极大值点，绕组宽度和线圈厚度对平均悬浮力峰值分别为单调增函数；最后，依托中车长春轨道客车股份有限公司超导电动试验线进行了悬浮系统测试试验，实测车辆垂向平均高度相比计算获得的平衡位置相差0.56 mm，校核了该设计方法的准确性和有效性。

关键词：电动悬浮；悬浮系统；设计方法；试验线

中图分类号：U237　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2024)03-0013-06

0　引言

轨道交通车辆相比飞机具有诸多优势，但传统的轮轨车辆很难经济、稳定地运行在400 km/h以上的速度[1-2]，因此人们将磁悬浮铁路作为高速、超高速应用的主要交通制式，并开展研究[3]。在国内外众多科研工作者的努力下，磁浮交通技术日趋成熟，日本已经创造了超导电动悬浮车辆603 km/h的载人试验速度，成为下一代高速运载工具的样本之一[4]。

开展磁浮交通技术的研究，一般经历原理样机开发、试验线测试、工程化样车开发、线路测试等阶段[5]。例如，日本从1962年就开始了磁悬浮列车的研究，1972年依托LSM200型超导磁悬浮试验车确立了电动悬浮的技术路线；随后开展了宫崎试验线的建设，并于1977年实现倒“T”形轨道的车辆悬浮测试，经过技术对比及迭代升级，1980年正式采用“U”形轨道，并在此基础上又开发了多款试验车辆，在1994年实现了当时最高载人速度411 km/h[6-7]；为了开展更加接近实际商业化运行相关试验研究，1996年日本又完成了长度18.4 km的山梨试验线建设，并在此线路上持续开展了近30年的工程化论证和商业试运行[8]。

对于超导电动悬浮技术而言，车辆与地面悬浮导向线圈的作用为被动式的电磁作用力，一旦车辆与地面线圈的尺寸、形式、结构设计完成，车辆与地面的交互作用关系就已经确定，车辆与地面线圈设计合理的超导电动悬浮系统无须通过控制器进行干预[9]。因此，超导电动悬浮系统是一种提前被验证和校核设计的系统，而这种设计方法是需要通过原理样机和试验线路进行验证和校核。对于电磁力计算方法，文献[10]

基金项目：吉林省科技发展计划（20220201002GX，20230201124GX）；中国中车股份有限公司原创技术十年培育专项（2022CGY014）
通信作者：李　凯，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: lk86@163.com
引用格式：谭富星, 李凯, 于淼, 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.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.125.
Citation：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.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.125.

通过建立完整的动态电路模型，系统分析了电动悬浮列车的运行特性；文献[11]使用边界元法计算互感，并结合拉普拉斯变换对三维电磁力进行了计算；文献[12]建立了电动悬浮电磁力计算模型，将地面线圈简化为二维模型，提升了模型的计算速度；文献[13]开展了电动悬浮列车悬浮和导向技术的分析，基于“场–路”相结合的方法建立了“8”字形线圈非交叉连接型和交叉连接型的电磁力计算数据模型，并使用计算机仿真得出了电磁力随垂向位移和横向位移的变化关系；文献[14-17]使用谐波近似法、纽曼公式和有限元法开展了线圈互感计算，进而开展了“8”字形线圈感应电流计算和电磁力计算；文献[18-19]建立有限元模型开展了电磁力计算。

目前，国内关于超导电动悬浮的研究大多停留在计算和设计阶段，牵头单位主要有中车长春轨道客车股份有限公司（简称“中车长客”）和中国航天科工集团第三研究院（简称“航天三院”），对关键技术开展了相关研究，完成了核心子系统的工程化、小系统样机开发，建成了轨道长度200 m的高温超导电动悬浮全要素试验系统，但均无全尺寸试验线，亟须开展原理样机的动态试验对计算结果和设计方案进行验证，为工程化样车的开发提供基础。本文主要围绕中车长客超导电动悬浮全要素试验线的开发，特别是电动悬浮系统的设计和试验测试结果，进行分析研究，对平均悬浮力峰值开展计算，并结合制造工艺和成本获得悬浮线圈结构参数，进而获得悬浮系统稳态工作平衡位置，最后进行悬浮系统测试试验，将实测数据与计算数据进行对比。本文研究结果可对悬浮系统设计方法的准确度进行校核，为下一步工程化样车开发提供重要参考。

1 试验线系统组成及参数

为了在既有200 m长的试验线上实现悬浮系统的设计验证工作，以及为后续工程化车辆开发提供技术储备，试验线系统采用全要素设计，主要包括轨道系统、原理样车、超导磁体系统、测速定位系统、车地通信系统、运行控制系统、牵引供电系统，各系统组成示意如图1所示。值得注意的是，轨道采用“U”形轨形式，分为加速段、悬浮段和制动段3部分，轨道两侧全程铺设牵引线圈，其中悬浮段额外铺设“8”字线圈，制动段额外铺设涡流制动板，悬浮段走行面相对其他区域下凹40 mm。

当处于电动悬浮模式的车辆速度较低时，由于所产生的感生磁场小不足以维持整车的悬浮，需要采用走行轮进行初始支撑，直至达到某一初始悬浮速度才可以通过电磁力进行悬浮，因此，在较短的试验线设计中，为了能够快速切换走行支撑与电磁支撑，本方案采用了悬浮区走行面强制下凹的方式。

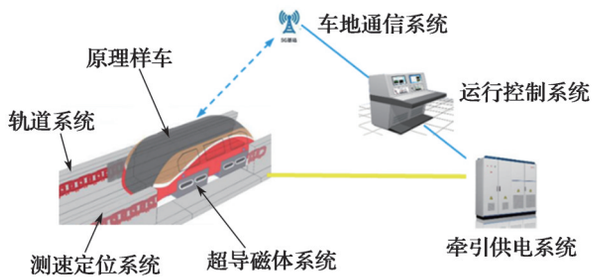


图1 试验线系统组成示意图

Fig. 1 Composition of test line system

悬浮力来自于车载的超导线圈与地面安装的“8”字形线圈产生的互感作用。“8”字形线圈为闭合的零磁通线圈，不外接电源；超导线圈中心线与“8”字形线圈中心线有一定的偏移量，使超导磁体的主要磁通覆盖在“8”字线圈的下半部分。当车辆运动时，超导线圈磁场覆盖区域的地面“8”字形线圈内会产生感生电流，从而在两者之间产生电磁力，这个电磁力的垂直分力即为车辆悬浮力，因此悬浮系统的设计聚焦于如何实现满足车辆悬浮的电磁力。

表1 试验线系统顶层参数

Table 1 Top level parameters of test line system

项目	参数值	项目	参数值
轨道长度/m	200	超导磁体距悬浮线圈距离（电磁间隙）/mm	65
最大车速/(m·s^{-1})	15	超导磁体表面最大磁密/T	≥1
试验车质量/t	2.7	超导磁体极距/mm	540
轨道宽度/mm	2 230	超导磁体磁动势/(kAt)	390

2 悬浮系统设计

2.1 悬浮电磁力计算原理

本文基于动态电路方程和虚功原理求解超导电动悬浮系统中的电磁力，单个“8”字形线圈等效电路如图2所示。

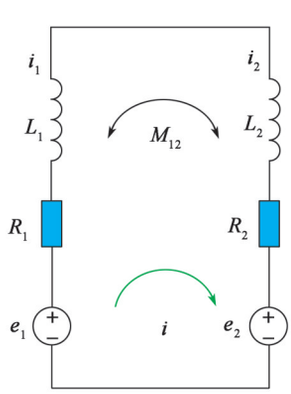


图2 “8”字形线圈等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of '8' shaped coil

在计算“8”字形线圈电流时，针对单侧超导磁体和“8”字线圈建立电路方程，方程如下：

$$\begin{bmatrix}u_8\\u_s\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}R_8 & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & R_s\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I_8\\I_s\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{M}_{88} & \boldsymbol{M}_{8s}\\ \boldsymbol{M}_{s8} & \boldsymbol{M}_{ss}\end{bmatrix}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}I_8\\I_s\end{bmatrix}+v_x\begin{bmatrix}\boldsymbol{G}_{x88} & \boldsymbol{G}_{x8s}\\ \boldsymbol{G}_{xs8} & \boldsymbol{G}_{xss}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I_8\\I_s\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：u_8,u_s分别为“8”字形线圈和超导线圈的外部输入电压；I_8,I_s分别为流过“8”字形线圈和超导线圈的电流；R_8,R_s分别为“8”字形线圈和超导线圈自身的电阻；$\boldsymbol{M}_{88}$,$\boldsymbol{M}_{ss}$分别为“8”字形线圈互感和超导线圈电感矩阵；$\boldsymbol{M}_{s8}$,$\boldsymbol{M}_{8s}$分别为“8”字形线圈和超导线圈的互感矩阵；$\boldsymbol{G}$为线圈互感梯度矩阵；v_x为车速。

根据电流方程首先求解“8”字形线圈感生电流，然后再分别计算两侧的电磁力，最后求和，所得结果即为整车电磁力。设x方向为列车前进方向，y方向为列车横向，z方向为列车垂向，其中各分力为：

$$\left.\begin{aligned}F_x&=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}I_iI_j\left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial x}-\frac{\partial M_{(n+1)j}}{\partial x}\right)+\sum_{i=1}^{v}\sum_{j=1}^{w}I_iI_j\left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial x}-\frac{\partial M_{(v+1)j}}{\partial x}\right)\\F_y&=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}I_iI_j\left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial y}-\frac{\partial M_{(n+1)j}}{\partial y}\right)+\sum_{i=1}^{v}\sum_{j=1}^{w}I_iI_j\left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial y}-\frac{\partial M_{(v+1)j}}{\partial y}\right)\\F_z&=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}I_iI_j\left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial z}-\frac{\partial M_{(n+1)j}}{\partial z}\right)+\sum_{i=1}^{v}\sum_{j=1}^{w}I_iI_j\left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial z}-\frac{\partial M_{(v+1)j}}{\partial z}\right)\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：F_x为电磁阻力；F_y为导向力；F_z为悬浮力。

式(2)中第一项为车体一侧m个超导线圈和n个“8”字形线圈的电磁力，第二项为车体另一侧w个超导线圈和v个“8”字形线圈的电磁力。

2.2　悬浮系统组成及参数

试验线悬浮系统由安装在车辆上的“8”字形线圈和8个超导线圈组成。图3为2个超导线圈所示区域，“8”字形线圈安装在地面上，并沿着车辆运行方向周期性排列，周期长度为360 mm，每个“8”字形线圈由上下2个半线圈及其连接导线组成（导线在图中并未示意），上下半线圈采用等尺寸设计，半线圈间隙为20 mm。根据轨道安装要求限定了“8”字形线圈宽度为330 mm，2个超导线圈相距540 mm（极距），“8”字形线圈的倒角大小对悬浮力几乎没有影响，本文不进行优化计算。

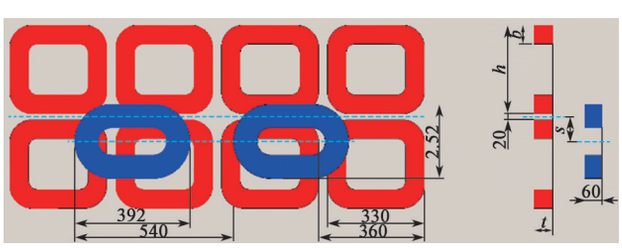


图3　悬浮系统组成关系(2个超导线圈范围)

Fig. 3　Levitation system composition (within the range of 2 superconducting coils)

在结构尺寸方面，对于已经确定的超导线圈尺寸，其系统悬浮力F_z主要受到“8”字形线圈尺寸的影响，包括半线圈高度h、绕组宽度b和线圈厚度t。通过定量分析其影响规律后，再确定合理的结构尺寸参数，进而计算目标车重所需的偏移量s，为后续轨道与车辆系统的设计提供依据。根据实际结构限制，相关参数设计范围如下：280 mm≤h≤340 mm，46 mm≤b≤64 mm，16 mm≤t≤22 mm。

2.3　线圈尺寸影响分析

为简化其他变量影响，令车速为15 m/s，车辆横向居中不变，计算悬浮力F_z与其他变量的关系。考虑到在1个极距周期长度内，“8”字形线圈的离散性会导致悬浮力F_z的波动，因此1个周期内的平均悬浮力F_{z_avg}更具有代表性，而该平均悬浮力F_{z_avg}是偏移量s的函数，如图4所示。为了避免在设计初期引入非结构参量s，而且平均悬浮力的峰值F_{z_max}决定了某一参数条件下的最大悬浮能力，直接影响悬浮系统性能，故将重点讨论F_{z_max}与线圈结构各参量之间的关系。

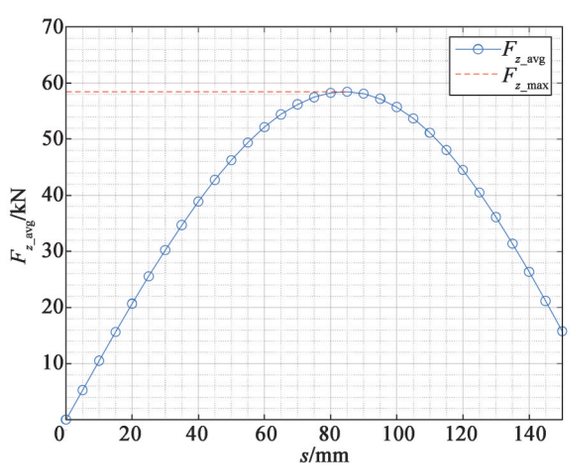


图4　平均悬浮力与平均悬浮力峰值关系

Fig. 4　Relationship between the average levitation force and its peak value

当线圈厚度t=16 mm时，F_{z_max}与h、b的关系如图5所示。当某一绕组宽度b不变时，h的增加使F_{z_max}先增大后减小，极大值出现在h=300 mm处，并且不受绕组宽度b变化的影响；当某一半线圈高度h不变时，F_{z_max}随着b的增大而增大，并且增加的幅度逐渐缩小。

当绕组宽度b=46 mm时，F_{z_max}与h、t的关系如图6所示。当某一线圈厚度t不变时，随着h的增加会使F_{z_max}出现极大值点，极大值同样出现在h=300 mm处；线圈厚度t变化并不影响与极大值出现相关的h值；当某一半线圈高度h不变时，F_{z_max}随着t的增大而增大，并且增加的幅度表现为逐渐缩小。

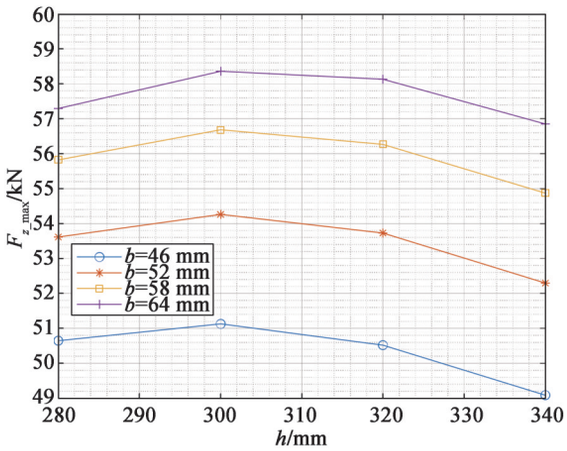


图5 平均悬浮力峰值与半线圈高度、绕组宽度的关系

Fig. 5 Relationship between the peak value of average levitation force and half coil height and winding width

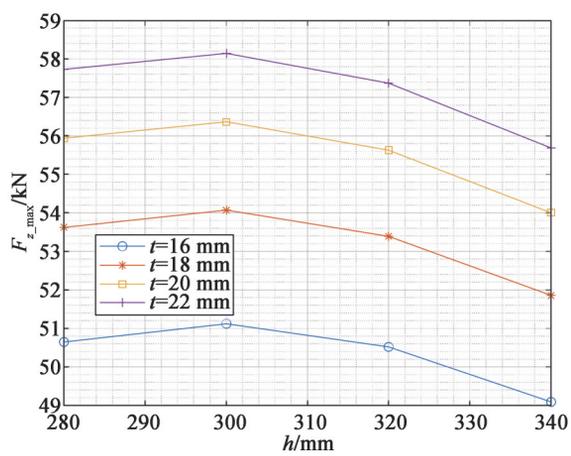


图6 平均悬浮力峰值与半线圈高度、线圈厚度的关系

Fig. 6 Relationship between the peak value of average levitation force and half coil height and coil thickness

根据上述计算结果可以得出，在计算区间内，半线圈高度h对F_{z_max}具有极大值点，变量绕组宽度b和线圈厚度t对F_{z_max}都为单调增函数。因此，在参数选择上应优选h=300 mm，绕组宽度b与线圈厚度t取最大值。但绕组宽度b与线圈厚度t均与线圈生产成本有关，二者同时取最大值时，生产成本最高。考虑到试验车辆质量为2.7 t，为了提高悬浮安全冗余，平均悬浮力峰值取高于车重1.5倍以上的参数组合，随后进一步计算车辆平衡位置，进而对设计参数实现校核验证。因此在本阶段综合数据及成本选取如表2所示的参数组合。

表2 “8”字形线圈尺寸参数

Table 2 Size parameter of '8' coil mm

参数名称	参数值
半线圈高h	30
绕组宽度b	64
线圈厚度t	18

2.4 车辆悬浮平衡位置校核

当得到结构参数初算结果后，需开展悬浮平衡位置计算，以1个周期内的平均悬浮力F_{z_avg}来估计试验车辆的稳定悬浮位置。图7为当线圈参数如表2所示时，平均悬浮力F_{z_avg}与垂向偏移量s之间的关系。从图7可以看出，随着偏移量s的增加，F_{z_avg}也逐渐增加；当F_{z_avg}达到车重（即为26.5 kN）时，认为车辆处在悬浮的平衡位置s_0，此时超导线圈的中心线相对于“8”字形线圈中心线的偏移量s_0=19.5 mm，而且在该值附近，平均悬浮力F_{z_avg}单调增加，悬浮刚度为1.37 kN/mm，具有负反馈特性，故表2所示参数满足车辆悬浮要求。

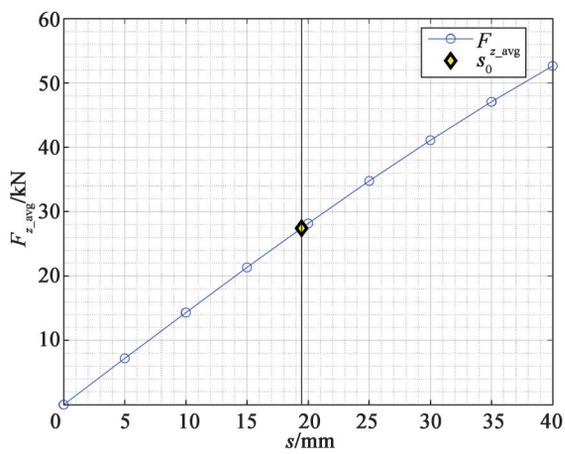


图7 平均悬浮力随偏移量的变化规律

Fig. 7 Change rule of the average levitation force with the offset

3 试验验证

3.1 试验车辆及测量系统

根据图7在50 km/h速度下悬浮力的计算结果，为了减少初始激扰，相对于“8”字形线圈中心，调节超导磁体中心向下偏移20 mm，即为计算得到的平衡位置s_0。试验车辆如图8所示，超导磁体安装在车辆两侧，每侧布置2个超导磁体，每个磁体内设置2个超导线圈，整车共有8个磁极；在每个超导磁体下表面布置有垂向距离传感器，在初始区域进行零位标定，用来测量走行面与车辆的相对高度。

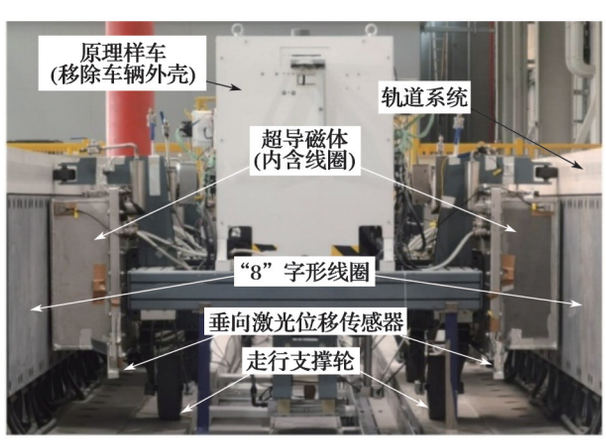


图8 试验线车辆及传感器布置图

Fig. 8 Installation photo of the vehicle with sensors on the test line

3.2　悬浮测试结果

车辆动态运行采用满功率牵引，加速区为走行轮支撑，走行面与地面标高一致，为0 mm；进入悬浮区后，因走行面下凹，标高为−40 mm，车辆转换为电磁支撑，将此时采集到的悬浮高度进行平均值处理，得到如图9所示结果。

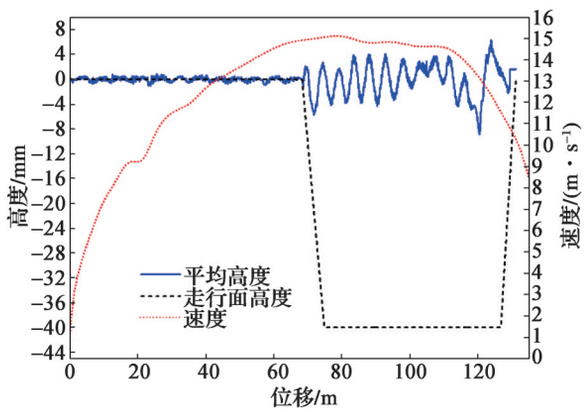


图9　悬浮试验测试结果

Fig. 9　Result of levitation test

由图9可知，在试验结果中，“位移”坐标0~68 m为车辆的走行轮支撑区间；68~74 m为过渡区间，轨道走行面斜坡下降，车辆由走行轮支撑切换为电磁支撑；74~126 m为车辆的电磁支撑区间，即为电动悬浮测试区间；126 m后的走行面逐渐恢复至标准高度。在电动悬浮阶段试验车速度初期达到15.1 m/s，并稳定在14.3 m/s以上，直到109 m后由于车辆制动，速度开始大幅度下降。在悬浮区96 m前，速度范围为14.7~15.1 m/s，从垂向位移传感器测量得到的数据可以看出，位移波动范围是−5.7~3.9 mm，该悬浮区域垂向位移的平均值为−0.56 mm，结合车辆的超导磁体中心相对于“8”字形线圈中心初始整备偏移量s_0（s_0=19.50 mm），计算实测平衡位置s_1=19.56 mm。

4　结论与展望

超导电动悬浮系统属于被动悬浮模式，是一种被动设计的系统，设计方法需要经过验证。本文围绕电动悬浮设计方法进行分析研究，获得以下结论：

①依据动态电路方程和虚功原理，完成了超导电动悬浮系统的线圈结构参数设计。通过试验线动态测试，垂向平均高度相比计算获得的平衡位置相差0.56 mm，验证了该方法的准确性和有效性。

② 通过分析“8”字形线圈尺寸对平均悬浮力峰值的影响规律，得出如下优化参数：半线圈高度h=300 mm，绕组宽度b=64 mm，线圈厚度t=18 mm，这些参数为“8”字形线圈的工程化设计提供参考。

③总结了工程上可行的电动悬浮系统设计方法，该方法将应用于全尺寸超导电动悬浮工程样车的悬浮系统设计校核。同时，结合降低线路成本目标，未来将进一步开展牵引、悬浮、导向三合一线圈的研究，逐步提高超导电动磁浮技术的工程应用成熟度。

参考文献：

[1] 刘士莒, 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.

[2] 魏庆朝, 孔永健. 磁悬浮铁路系统与技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
WEI Qingchao, KONG Yongjian. System and technology for maglev transit[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2003.

[3] 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.

[4] 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. Japanese superconducting maglev trains set a record for speed per hour[J]. Urban mass transit, 2015, 18(5): 134.

[5] 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.

[6] 商福昆. 宫崎实验线新磁浮实验车MLU−002N[J]. 铁道机车车辆, 1995(1): 58-60.
SHANG Fukun. New maglev experimental vehicle MLU-002N for Miyazaki experimental line[J]. Railway locomotive & car, 1995(1): 58-60.

[7] KYOTANI Y. Recent progress by JNR on maglev[J]. IEEE transactions on magnetics, 1988, 24(2): 804-807.

[8] OHSAKI H. Review and update on maglev[R]. Karlsruhe: Cryogenics Society of Europe (CSE), 2017: 1.

[9] 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.

[10] 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.

[11] DAVEY K. Analysis of an electrodynamic maglev system

[J]. IEEE transactions on magnetics, 1999, 35(5): 4259-4267.

[12] 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.

[13] 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(9): 23-26.
WAN Shangjun, QIAN Jin'gen, NI Guangzheng, et al. Study of the levitation and guidance technology for electrodynamic suspension maglev vehicle[J]. Proceedings of the CSEE, 2000(9): 23-26.

[14] 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.

[15] 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): 1-9.

[16] 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.

[17] SU Zhenhua, LUO Jun, MA Guangtong, et al. Fast and precise calculation of mutual inductance for electrodynamic suspension: methodology and validation[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2022, 69(6): 6046-6057.

[18] CHEN Dachuan, 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): 1-6.

[19] 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.

Design and verification of levitation system for superconducting electrodynamic suspension test line

TAN Fuxing[1], LI Kai[1], YU Miao[1], WANG Aibin[1], YANG Jing[1], LI Xiaofen[2]

(1. Maglev Research Institute, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China;
2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Superconducting electrodynamic suspension is a maglev transportation system for high-speed and ultra-high-speed operation. After the design of the coil structure and electromagnetic parameters of the superconducting electrodynamic suspension system is finalized, the change patterns of the levitation force and guiding force cannot be adjusted by the onboard controller. Therefore, the size of the coil is very important. From an engineering perspective, the feasible design method for the electrodynamic suspension system was expounded and analyzed in this study. Firstly, based on the dynamic circuit equation and virtual work principle, the peak value of the average levitation force under a certain parameter condition was calculated. And the structure parameters of the levitation coil were obtained by conducting a process and cost analysis. Then, the relationship between the size of the "8" shaped coil and the superconducting magnetic poles was calculated, and the vertical offset when the vehicle weight was equal to the average levitation force was obtained, which was the steady-state working balance position of the levitation system. In addition, the influence pattern of the "8" shaped coil size on the peak value of average levitation force was determined: the half coil height exhibited an extremely large point for the peak value of the average levitation force, and the winding width and coil thickness were monotonic increasing on the function of the peak value of the average levitation force respectively, if other variables remain unchanged. Finally, the levitation system test was carried out on the superconducting electrodynamic suspension test line of CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd.. The test results show that the difference between the measured vertical average height of the vehicle and the calculated balance position is 0.56 mm, which have checked the accuracy and effectiveness of the design method for the levitation system.

Keywords: electrodynamic suspension; levitation system; design method; test line

收稿日期：2023-07-23；修回日期：2024-01-08