高温超导-永磁混合悬浮车基本系统的理论模型与实验

陈楠¹, 陈洋², 孙睿雪¹, 郑琚^{1*}, 郑欣欣¹, 邓自刚¹

1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031;

2. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031

* 联系人, E-mail: jzheng@swjtu.edu.cn

2019-10-10 收稿, 2019-11-13 修回, 2019-11-14 接受, 2020-01-07 网络版发表

国家自然科学基金(51875485)、四川省科技计划(2019YJ0229)、成都市科学技术局国际科技合作项目(2019-GH02-00002-HZ)和牵引动力国家重点实验室自主课题(2018TPL_T06)资助

摘要 具有磁通钉扎特性的高温超导磁悬浮是自然界唯一一种悬浮导向一体化自稳定悬浮系统, 但其载重能力相对较弱; 永磁体斥力式的永磁悬浮具有结构简单、载重能力强的优点, 但在横向上不稳定. 针对两种磁悬浮技术特征, 基于现有的高温超导磁悬浮环形实验线“Super-Maglev”, 本研究以实现高温超导磁悬浮实验车大载重为目标, 提出了一种新型的高温超导-永磁混合悬浮车系统概念及理论设计方法. 首先, 通过分别对永磁悬浮模块和超导导向模块建立在同一磁轨条件下的电磁模型, 仿真对比分析两模块的磁力特性发现, 两模块在垂向上的悬浮工作区间差异明显, 在横向上具有相反的横向刚度. 其次, 结合恩肖定理, 预测了混合悬浮系统在横向稳定条件下的最大载重能力及稳定工作区间. 最后, 基于仿真结论和现有的高温超导磁悬浮实验车, 设计选用具有垂向解耦横向刚接功能的垂向直线轴承连接两悬浮装置, 始终保持两模块在垂向上独立运动及横向上刚性连接, 实现车载永磁载重与超导导向的功能匹配互补, 搭建了高温超导-永磁混合悬浮原理实验样车, 可载一人安全运行. 进一步的准静态力学及动态振动实验共同验证了混合悬浮原理实验车具有成本低、结构简单、无源自稳定等优点, 在载重能力提升上有一定的优势. 该工作为超导磁浮轨道交通应用提供了新的技术途径.

关键词 高温超导块材, 超导磁浮, 永磁悬浮, 混合悬浮

磁浮列车实现了车轨间无接触摩擦, 因而具备高速、环保、非接触运行、分布载荷等特点, 近年来被广泛认为具有广阔的发展前景. 2019年5月23日, 我国时速600 km高速磁浮试验样车在青岛正式下线, 标志着我国在高速磁浮技术领域实现重大突破. 倘若从磁悬浮技术原理分析来看, 可分为永磁悬浮(permanent magnetic levitation, PML)^[1,2]、电磁悬浮(electromagnetic levitation, EML)^[3,4]、电动悬浮(electrodynamic levitation, EDL)^[5-9]和超导钉扎悬浮(superconducting magnetic levitation, SML)^[10-15]. 我国时速600 km高速磁浮试验样车属于电磁悬浮制式. 常导电磁和低温超

导电动磁浮车从原理诞生到应用推广, 都经历了半个多世纪的研发周期. 诸多研究显示, 每种磁悬浮制式独立成系统, 在关键技术或应用指标上各具长处. 为了获得更好的综合性能指标, 混合磁悬浮概念应运而生.

混合磁悬浮概念最早诞生于轴对称式磁轴承和飞轮储能领域. 目前已经完成了全尺寸样机, 主要包括韩国电力研究所SML+PML+EML混合制式^[16-22]、美国Boeing公司SML+PML混合制式^[23,24]、德国ATZ公司SML+PML混合制式^[25-27]的飞轮储能系统. 在平移对称式磁悬浮轨道交通应用领域, 长沙磁悬浮列车^[28]、青岛四方高速磁浮试验样车采用了EML+PML设计方案.

引用格式: 陈楠, 陈洋, 孙睿雪, 等. 高温超导-永磁混合悬浮车基本系统的理论模型与实验. 科学通报, 2020, 65: 847-855

Chen N, Chen Y, Sun R X, et al. Theoretical model and experiment of the hybrid Maglev vehicle employing high temperature superconducting magnetic levitation and permanent magnetic levitation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 847-855, doi: 10.1360/TB-2019-0613

而日本关西大学超导磁悬浮台最早提出了用于货物运输系统的SML+PML混合悬浮系统概念,并关注在驱动系统的研究.目前,SML+PML混合悬浮仅存在于理论设计概念和小型实验模型^[29-31].不论何种应用场景,混合磁悬浮制式原理都不约而同地使用了PML,目标多为利用永磁体的强磁性、永磁悬浮结构简单、易于实现等特点提高整车系统悬浮载重能力,减少电磁热损耗.

如文献^[1,2,8-15]所述,PML负载能力强,但需要辅助导向系统.而SML利用了车载超导块材(high temperature superconducting bulk, HTS bulk, 通常为块状YBaCuO或GdBaCuO超导体)的磁通钉扎特性,与沿线路铺设的永磁轨道(permanent magnet track, PMT, 以下或简称“磁轨”)作用产生磁力来提供悬浮和导向力.这种高温超导钉扎悬浮在横向和垂向上都存在被动稳定区间,是一种大尺寸悬浮导向一体化自稳定的悬浮系统^[32],推进和制动通常由独立铺设的直线电机实现.此外,从我国SML制式发展历程来看,从2000年西南交通大学的世界首辆高温SML实验车^[15]诞生至今,SML制式的研发经历了19年的积累和沉淀,目前正在步入中试研制阶段.其中,如何进一步优化超导悬浮系统载重能力是一个重要问题.

因此,本研究从诞生于我国的世界首辆高温SML实验车^[15]的SML原理出发,基于西南交通大学牵引动力国家重点实验室研制成功的高温超导磁悬浮环形实验线^[11],利用其真实的磁轨系统,进行了高温超导-永磁混合悬浮系统的理论设计与实验研究工作,最终实现了可载一人的超导-永磁混合悬浮原理实验车.更多

的准静态和冲击振动试验^[33]进一步验证了该混合悬浮原理实验车载重能力得到提升,并且很好地继承了SML及PML制式共同的无源自稳定特征及车轨结构简单优点.

1 高温超导-永磁混合悬浮模型与仿真

SML制式与PML制式在悬浮上均具有无源自稳定,结构简单的优势.其中,PML试验车的承载能力可达到3~6 t/m,但是需要额外的导向控制;而悬浮导向一体化自稳定的SML工程化试验车设计并实验验证的承载能力超过2 t/m^[34],达到工程应用水平.此外,这两种磁悬浮制式均采用永磁体(材料为NdFeB)磁轨形式.这表明,两者车载悬浮机构均可在公用磁轨上运行,为超导-永磁混合悬浮原理设计提供了原理出发点.兼具SML制式的无源自稳定及PML制式的大载重能力特征的高温超导与永磁混合悬浮系统概念由此而生.

混合悬浮系统由两种磁悬浮模块(SML模块和PML模块)组成.具有被动自稳定性的SML模块作为混合磁悬浮系统导向的核心,而PML模块主要用于实现更大载重功能.两个模块共同基于现有的高温超导磁悬浮环形实验线“Super-Maglev”^[11]的Halbach型永磁轨道及超导悬浮装置(内含HTS bulk)展开理论设计,如图1(a)所示.环形实验线总长45 m,由2条长3.6 m的直线段和2条半径为6 m的曲线段组成,并铺设了由NdFeB永磁体按Halbach阵列排布的永磁双轨道;在轨道的直线段铺设了3 m长直线电机,用于高温超导磁悬浮车的推进和制动;高温超导磁悬浮实验车由4个超导悬浮装置组成,每个超导悬浮装置内含有两两并排排列的共

图1 (网络版彩色)高温超导磁悬浮环形实验线“Super-Maglev”. (a) “Super-Maglev”全景图^[11]; (b) 高温超导块材与永磁轨道截面示意图及仿真工况. FCH: field cooling height, 场冷高度; WH: working height, 工作高度

Figure 1 (Color online) HTS Maglev ring test line “Super-Maglev”. (a) Panorama of the “Super-Maglev”; (b) 2D schematic diagram and simulation conditions of the onboard HTS bulks and permanent magnet track. FCH: field cooling height; WH: working height

24块HTS块材(尺寸为64 mm×32 mm×13 mm)^[11]. 为得到其混合悬浮稳定性理论判断依据, 本节首先给出了SML与PML的仿真模型和对比分析结论.

1.1 SML模块模型及仿真求解

SML模块车轨关系使用的是现有的高温超导环形实验线模式. 如图1(b)所示, 在超导块材垂向运动过程中, 始终保持超导块材与永磁轨道中心对齐, 并定义悬浮高度为块材底部到PMT上表面的距离. 早期的实验结果表明, 当悬浮高度相同时, SML模块的悬浮力会随场冷高度(field cooling height, FCH)降低而降低, 导向力随FCH降低而增大^[35]. 考虑到环形实验线弯道半径较小, 为避免发生碰擦, 损伤超导悬浮装置, 本研究选择SML模块的FCH为15 mm, 以保证提供足够的悬浮高度和横向稳定性. 在常温下, 车载HTS块材处于正常态. 要使SML模块启动悬浮, 首先, 将HTS块材置于轨道上方15 mm处, 使之冷却进入超导状态. 随后, 释放超导块材, 由于重力作用, 块材将向永磁轨道靠近至工作高度(working height, WH)10 mm, 块材内部将产生感应电流, 与永磁轨道间相互作用表现为悬浮力, 由此, SML模块进入稳定悬浮状态.

在模型建立方面, 假设永磁轨道磁场沿运行方向上无限均匀, 车载块状高温超导体沿纵向具有对称性, 可将模型简化为如图1(b)所示的二维模型. 其中, 磁轨模型: 设置NdFeB永磁体的剩余磁通密度为 $B_r=1.2$ T, 磁化方向如图1(b)所示. 高温超导块材模型: 独特的磁通钉扎特性, 在外场下超导体电场强度 $\mathbf{E}$ 与电流密度 $\mathbf{J}$ 表现出强非线性特征. 本研究选择幂指数模型^[36](公式(1))描述超导体的 $\mathbf{E}$ - $\mathbf{J}$ 特性, 符合本研究涉及的准静态磁力计算工况, 不考虑磁通密度和温度对超导体临界电流密度的影响.

$$E_z = E_0 \left(\frac{|\mathbf{J}|}{J_c} \right)^n, \quad (1)$$

其中, $E_0=1 \times 10^{-4}$ V/m, 表示与超导材料和温度有关的常数; $J_c=1.1 \times 10^8$ A/m², 为临界电流密度; 幂指数 $n=21$.

在有限元方法分析块状高温超导体的电磁力特性及交流损耗计算问题中, 采用磁场强度 $\mathbf{H}$ 法求解Maxwell方程组的法拉第电磁感应方程^[37]:

$$\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{E} = 0. \quad (2)$$

其中, μ_0 为真空中的磁导率. 对高温超导块材 $\mathbf{E}$ - $\mathbf{J}$ 特性,

选择式(1)所示的幂指数模型, 并利用安培定律, 建立电流密度 $\mathbf{J}$ 与磁场强度 $\mathbf{H}$ 的关系式:

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H}. \quad (3)$$

在此二维模型中, 以磁场强度 $\mathbf{H}$ 作为状态变量, 仅需用 H_x 和 H_y 分别表示磁场强度在 x 和 y 方向的值. 将式(1)和(3)代入(2)中, 建立高温超导体的电磁控制方程:

$$\begin{bmatrix} \mu_0 & 0 \\ 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial H_x}{\partial t} \\ \frac{\partial H_y}{\partial t} \end{bmatrix} + \nabla \times \begin{bmatrix} 0 & E_z \\ -E_z & 0 \end{bmatrix} = 0. \quad (4)$$

其中, 仿真工况如图1(b)中所示, HTS块材在15 mm处经冷却后, 先上升到悬浮高度90 mm, 再下降至工作高度10 mm, 随后回到90 mm, 计算垂向运动中悬浮力变化. 其次, 在工作高度10 mm高度处进行横向运动, 在平衡点±20 mm横向区间内继续往复运动, 计算横向运动中导向力变化及悬浮力变化.

最后, 由洛伦兹力计算公式(5)和(6), 对HTS区域进行积分, 计算得到超导体的悬浮力和导向力:

$$\text{悬浮力 } F_y = \int J_z \cdot B_x dx dy (\text{N/m}), \quad (5)$$

$$\text{导向力 } F_x = \int J_z \cdot B_y dx dy (\text{N/m}). \quad (6)$$

式中, B_x 为磁感应强度的水平分量, B_y 为磁感应强度的竖直分量.

1.2 PML模块模型及仿真求解

斥力式PML系统实现稳定的关键点包括永磁悬浮模块与磁轨严格对心. 图2所示为永磁(permanent magnet, PM)阵列和PMT截面的示意图. 在垂向运动时, 保持悬浮PM阵列与PMT中心对齐, 定义该位置为PM的平衡点(横向位移0 mm), 定义悬浮高度为PM阵列下表面与PMT上表面之间的距离.

由于当前关于永磁体及永磁体间磁力的仿真技术非常成熟, 采用常用的有限元软件ANSYS即可完成对PML模块的磁力计算. PM阵列采用NdFeB永磁体, 以Halbach型结构排布, 仿真中所用永磁体牌号为N42, 磁铁矫顽力为994 kA/m, 相对磁导率为1.09977854.

图2给出了PML模块悬浮力及导向力仿真工况. 首先, PM阵列由悬浮高度20 mm上升至90 mm过程中, 记录悬浮力的变化. 其次, 在悬浮高度30 mm处, 记录横向运动±20 mm的横向与垂向磁力特性.

图2 PM阵列与永磁轨道截面示意图及仿真工况

Figure 2 2D schematic diagram and simulation conditions of the onboard PM array and permanent magnet track

1.3 SML和PML模块悬浮和导向特性对比分析

为了更加清晰地比较SML和PML的悬浮和导向特性, 分别将两个模块的悬浮力和导向力最大值进行划分, 对力曲线作归一化处理, 如图3所示, 其中右上角图表示出各力曲线最大值。

图3(a)所示为居中平衡位置处两模块垂向运动悬浮力随悬浮高度变化关系图。其中, 对于SML模块, 从FCH 15 mm下降到WH 10 mm过程中, 悬浮力呈指数增长。从FCH 15 mm向上运动至20 mm时, 悬浮力下降至0 N。以FCH 15 mm为垂向回复平衡点, 向下运动时即表现为悬浮力, 向上运动表现为吸引力。这是超导钉扎自稳定悬浮特征的体现。此外, 在同一位置处, 下降时的悬浮力比上升时的悬浮力大, 出现了磁滞回线, 是由于钉扎中心的存在, 在运动过程中超导体内部钉扎磁通将受到较大的洛伦兹力作用, 少部分磁通将脱离钉扎中心, 故带来了典型力曲线的滞回现象。而对于PML模块, 随着悬浮高度的增加, 悬浮力下降缓慢, 由于磁轨产生的静磁场随悬浮高度增加衰减加快, 在悬浮高度增加到60 mm后逐渐趋近于0 N。永磁材料是一种具有强矫顽力的硬磁性材料, 增加外磁场强度对永磁材料进行再磁化是非常困难的, 因此在运动过程中, PML模块的悬浮力和导向力曲线中均不会出现回线。对比SML模块与PML模块, 同一个轨道外磁场下, 两模块悬浮力工作区间差异明显。SML模块由于自身钉扎特性仅在悬浮高度10~15 mm内表现为悬浮力, 而PML模块的悬浮力工作区间可为20~60 mm。倘若在负载条件相

同的情况下, SML模块和PML模块的工作高度必将不同。在混合悬浮系统设计时, 考虑到PML模块用以支撑系统受到的各种载重, 为保证混合悬浮系统中两模块处于各自稳定悬浮工作区间内, 就需要让两模块在垂向悬浮位置上相对独立。因此, 设计混合悬浮整车中两模块机械耦合关系时, 保持SML模块处于相对稳定悬浮间隙, PML模块处于自由可变悬浮间隙。

图3(b)给出了两模块横向运动过程中横向力的变化图。结果显示, 两模块横向力刚度方向不同, 并且只有SML模块具有导向可回复性能。随着悬浮间隙的减小和载荷的增加, PML模块的横向力会增大, SML模块导向力由于磁轨横向尺寸的限制也会存在极限, 因此系统载荷是有限的。图3(c)表示为横向运动过程中悬浮力变化曲线。可以看出, PML模块悬浮力呈轴对称分布, 且曲率较大, 表明其需要维持在平衡位置附近, 否则承载能力会急剧下降。因此, 从图3(b)和(c)整体分析中看出, 对于混合悬浮车的设计而言, 横向稳定性是至关重要的。

1.4 混合悬浮系统稳定悬浮工作区间分析

基于高温超导磁悬浮环形实验线“Super-Maglev”^[11], 现有的高温SML实验车使用了4个超导悬浮装置, 受其尺寸参数限制, 初步设计高温超导-永磁混合悬浮系统使用4个PML悬浮模块, 每个PM阵列纵向长度为100 mm。由此, 基于仿真结果, 计算得出混合悬浮系统中SML和PML两悬浮模块悬浮及导向特性。此外, 考虑到仿真结果与实际应用存在一定误差, 对所得数据进

图3 (网络版彩色)归一化后SML和PML模块悬浮特性对比及仿真结果最大数值(插图)。(a)平衡位置处垂向运动悬浮力-悬浮高度变化曲线;(b)横向运动时横向力-横向位移变化曲线;(c)横向运动时悬浮力-横向位移变化曲线

Figure 3 (Color online) Comparison on levitation performances of the PML module and the SML module after normalization with their maximum values (the insert images). (a) Levitation force versus levitation height when the PM or HTS bulk arrays are in the centrally aligned condition and moving vertically; (b) lateral force versus lateral movement; (c) levitation force versus lateral movement

行了修正,均乘以修正系数0.7^[38],预测出实际悬浮力及导向力大小。

根据恩肖定理^[39,40],稳定悬浮系统存在平衡点 (x_0, y_0, z_0) ,且平衡点处受力 $F_{(x_0, y_0, z_0)}$ 满足以下条件:

$$F_{(x_0, y_0, z_0)} = 0, \quad (7)$$

$$\nabla \cdot F_{(x_0, y_0, z_0)} < 0. \quad (8)$$

$$\frac{\partial F_{xPM}}{\partial x} + \frac{\partial F_{xSC}}{\partial x} < 0. \quad (9)$$

结合图3(b)和(c),可以预测,横向位移0 mm处为高温超导-永磁混合悬浮系统的初始平衡点。在此位置上,两模块的悬浮力之和已经满足支撑实验车自重和载重需求。从图3(b)可以看出,两模块的横向力刚度方向相反。

鉴于PML模块为不稳定悬浮,为了合理地分析未来混合悬浮实验系统的工作区间,首先需要满足恩肖定理的基本要求,即系统横向刚度小于0,如公式(9)所示。在FCH 15 mm时,图4分析了不同悬浮高度下PML模块稳定悬浮工作区间。基于式(9)的横向稳定性要求,得出了不同悬浮高度下PML模块的最大载重能力区间,表示为图4中临界横向刚度曲线所包括的区域。其次,进一步考虑到实际应用中PML模块会存在横向干扰情况,为保证混合悬浮系统横向稳定性和运行安全,提出了20%的横向刚度安全裕度,如式(10)所示。由此,分析给出了此安全裕度下不同悬浮高度下系统稳定工作区间,如图4中附加20%横向刚度限制的区域。

$$1.2 \frac{\partial F_{xPM}}{\partial x} + \frac{\partial F_{xSC}}{\partial x} < 0. \quad (10)$$

可以看出,当PML模块悬浮高度为25 mm时,PML与SML混合悬浮系统无法稳定悬浮;当PML模块悬浮高度为30 mm时,混合悬浮最大导向可恢复区间为 ± 5 mm。由此,随着对横向和垂向稳定工作条件的考虑,

图4 (网络版彩色)FCH 15 mm时混合悬浮系统自稳定工作区间预测
Figure 4 (Color online) Prediction of passive stable working area of hybrid Maglev system under the 15 mm FCH condition

在不同的30~60 mm悬浮高度下, PML与SML混合悬浮呈现出不同的导向可恢复区间, 涵盖持续空间的稳定悬浮状态, 也就是未来整车系统可稳定悬浮的工作区间, 这为混合悬浮原理实验车的设计提供了理论依据和指导.

2 混合悬浮原理实验车设计及实现

2.1 SML/PML模块间机械连接设计

在上述电磁关系的理论分析和混合机制建立基础上, 可以得出, 在两模块共同构成的混合悬浮整车系统中, 两者的机械耦合关系需保持相对独立, 不仅为SML模块保证相对稳定悬浮间隙, 而且为PML模块提供自由可变悬浮间隙. 设计PML模块使用4个PM阵列, 安装于两端超导悬浮装置之间, 并选用具有垂向解耦横向刚接功能的垂向直线轴承连接两悬浮模块, 始终保持两模块在垂向上独立运动及横向上刚性连接, 以实现车载永磁体载重与超导导向的功能匹配互补. 由图3和图4分析, PML模块的设计悬浮高度为30~60 mm, SML模块的设计悬浮高度为10~15 mm. 当悬浮高度为30 mm时, PML模块的理论承载预计为450 kg, 因此, 混合悬浮原理实验车设计可为一人乘坐.

图5所示为高温超导-永磁混合悬浮原理实验车三维设计图. 车体由SML模块(含4个超导悬浮装置)、PML模块(含4个PM阵列)、一级车架和4个垂向直线轴承组成. 其中, 一级车架包含2个转向架, 每个转向架横向两端分别安装了2个超导悬浮装置. 转向架间通过两块不导磁不锈钢板连接在一起, 对磁轨磁场影响较小, 不会影响PML与SML的磁力性能. 这一部分是高温超导磁悬浮“Super-Maglev”系统原有的. 此外, 通过增加垂向直线轴承, 将车载PML模块的PM阵列与一级车架相连, 并主要用于支撑承载支撑板及座椅. 垂向直线轴承由直线导轨和滑块组成, 直线导轨安装于PML模块上, 相应滑块安装在连接SML模块的一级车架上. 此时, 垂向直线轴承的滑块将有助于PML模块悬浮间隙的自由变化, 实现SML模块与PML模块在垂向上相互解耦.

在垂直方向上, PML模块可以随着负载变化自由滑动到对应的悬浮高度上, 而SML模块中超导体悬浮高度基本维持不变, 实现了SML模块和PML模块的垂向解耦, 同时保证了横向稳定. 垂向直线轴承的设计充分利用了SML和PML的互补优势, 满足混合磁悬浮车的功能要求.

图5 (网络版彩色)高温超导-永磁混合悬浮原理实验车三维设计图
Figure 5 (Color online) 3D design diagram of the principle hybrid Maglev vehicle body

2.2 混合悬浮原理实验车的实现

基于上述仿真及设计优化, 高温超导-永磁混合悬浮原理实验车研制成功, 如图6所示, 实现了载一人安全运行.

基于高温超导环形实验线的磁轨, 考虑到PML模块的理论承载能力(450 kg)和自重(75 kg), 对混合悬浮原理实验车在载重0~375 kg之间进行了静载实验, 观察其由空载到最大理论载重再到空载条件下车体平均悬浮工作高度变化情况. 当HTS块材充分冷却后, 记录空载时两模块悬浮高度和横向位移. 随后, 改变载重, 每次加载及减载的重量变化为25 kg, 先连续增载15次, 而后连续减载15次, 记录不同载重下悬浮高度和横向位移的变化. 图7给出了静态加载实验中横向位移与悬浮高度随载荷的变化曲线. 结果表明, 原理实验车最大

图6 (网络版彩色)高温超导-永磁混合悬浮原理实验车测试图. (a) 载人图; (b) 最高理论载荷测试现场

Figure 6 (Color online) Photos of the principle SML-PML hybrid Maglev vehicle. (a) Carrying one passenger; (b) testing the theoretical heaviest load

图7 (网络版彩色)静态加载实验中横向位移与悬浮高度(插图)随载荷的变化图

Figure 7 (Color online) Lateral movement and levitation height (the insert image) during increasing and decreasing load in the static loading experiment

载重为375 kg, 在增减载荷过程中横向位移保持在 ± 1 mm内。由此可知, SML模块可以提供可靠的导向力, 验证了混合悬浮系统的可行性。进一步的动态力学实验^[33]验证了垂向直线轴承良好地发挥了垂向解耦、横向刚接的功能。

基于现有的环形实验线^[11], 对混合悬浮原理实验车与现有的高温超导磁悬浮实验车“Super-Maglev”的载重能力进行了对比。在相同的FCH 15 mm, WH

10 mm的工况下, “Super-Maglev”的最大载重为384 kg, 而混合悬浮原理实验车的最大载重为450 kg, 增加了66 kg, 载重能力提高了17%。其中混合悬浮实验车中增加的PM阵列体积为1200 cm³, 价格为1872元, 比单块超导体的成本投入要小。而在“Super-Maglev”磁轨条件下, 单块超导体产生的悬浮力大约5 kg。可见, 混合悬浮技术在增加系统载重能力方面表现出一定的优势, 具有现实应用价值。但是, 当前原理实验车系统还未处于最优的设计工况, 还有待开展进一步研究工作。

3 结论

本研究提出了一种新型高温超导-永磁混合式悬浮车的设计方法及相关理论模型, 并基于我国高温超导磁悬浮环形实验平台的真实磁轨, 首次实现高温超导-永磁混合悬浮原理实验车。该系统相比原有的超导实验车系统, 载重能力提升17%, 成本投入较小。更多的准静态和冲击振动实验^[33]共同验证了该混合悬浮机制具有载重能力强, 并且继承了原有单一磁悬浮机制的无源自稳定特征及车轨系统结构简单的优点。

2018年1月25日, 中国中车青岛四方机车车辆股份有限公司在对我国时速600 km高速磁浮试验样车的研发过程中, 曾提出并认可了常导电磁和永磁混合悬浮组合的技术方案。随着高温超导磁悬浮轨道交通应用研究的推进, 高温超导-永磁混合悬浮原理也将成为一种新型有益的磁浮制式。

参考文献

- 1 Paden B A, Snyder S T, Paden B E, et al. Modeling and control of an electromagnetic variable valve actuation system. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2015, 20: 2654–2665
- 2 Long G A, Fiske O J, Paden B E. Design of a small-scale prototype for a stabilized permanent magnet levitated vehicle. In: Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Conference 2009, PTS A and B. Hollywood, California, USA, 2010. 1123–1128
- 3 Buth B, Lu B. Dynamic analysis of vehicle-guideway interaction in a maglev cargo transportation system. In: Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Houston, Texas, USA, 2013. 1–8
- 4 Jung K S, Shim K B. Noncontact conveyance of conductive plate using omni-directional magnet wheel. *Mechatronics*, 2010, 20: 496–502
- 5 Shu G, Meisinger R. State estimation and simulation of the magnetic levitation system of a high-speed maglev train. In: International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology. Harbin, Heilongjiang, China, 2011. 944–947
- 6 Fang J R, Montgomery D B, Roderick L. A novel Magpipe pipeline transportation system using linear motor drives. *Proc IEEE*, 2009, 97: 1848–1855
- 7 Park J H, Baek Y S. Design and analysis of a maglev planar transportation vehicle. *IEEE Trans Magn*, 2008, 44: 1830–1836
- 8 Kusada S, Igarashi M, Nemoto K, et al. The project overview of the HTS magnet for superconducting maglev. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2007, 17: 2111–2116
- 9 Fujii N, Hayashi G, Sakamoto Y. Characteristics of magnetic lift, propulsion and guidance by using magnet wheels with rotating permanent magnets. In: Proceedings of the 35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy. Rome, Italy, 2000. 257–262
- 10 Deng Z, Li J, Zhang W, et al. High-temperature superconducting magnetic levitation vehicles: Dynamic characteristics while running on a ring test line. *IEEE Veh Technol Mag*, 2017, 12: 95–102

- 11 Deng Z G, Zhang W H, Zheng J, et al. A high-temperature superconducting maglev ring test line developed in Chengdu, China. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2016, 26: 3602408
- 12 Mattos L S, Rodriguez E, Costa F, et al. MagLev-Cobra operational tests. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2016, 26: 3600704
- 13 D'Ovidio G, Crisi F. Suspension dynamic behaviour of HTS magnetically levitated bogie. *Mater Sci Forum*, 2014, 792: 198–203
- 14 Schultz L, de Haas O, Verges P, et al. Superconductively levitated transport system—The SupraTrans project. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2005, 15: 2301–2305
- 15 Wang J, Wang S, Zeng Y, et al. The first man-loading high temperature superconducting maglev test vehicle in the world. *Physica C*, 2002, 378–381: 809–814
- 16 Han Y H, Park B J, Jung S Y, et al. The improved damping of superconductor bearings for 35 kW h superconductor flywheel energy storage system. *Physica C*, 2013, 485: 102–106
- 17 Han Y H, Park K J, Park B J, et al. Results and analysis of an accident in 35-kW h SFES. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2013, 23: 5701806
- 18 Han Y H, Park B J, Jung S Y, et al. Study of superconductor bearings for a 35 kW h superconductor flywheel energy storage system. *Physica C*, 2012, 483: 156–161
- 19 Lee J P, Han S C, Park B C. Experimental estimation on magnetic friction of superconductor flywheel energy storage system. *J Magns*, 2011, 16: 124–128
- 20 Park B J, Han Y H, Jung S Y, et al. Static properties of high temperature superconductor bearings for a 10 kW h class superconductor flywheel energy storage system. *Physica C*, 2010, 470: 1772–1776
- 21 Lee J P, Jeong N H, Han Y H, et al. Assessment of the energy loss for SFES with rotational core type PMSM/G. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2009, 19: 2087–2090
- 22 Jung S, Lee J, Park B, et al. Double-evaporator thermosiphon for cooling 100 kW h class superconductor flywheel energy storage system bearings. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2009, 19: 2103–2106
- 23 Strasik M, Hull J R, Mittleider J A, et al. An overview of Boeing flywheel energy storage systems with high-temperature superconducting bearings. *Supercond Sci Technol*, 2010, 23: 034021
- 24 Hull J R, Strasik M, Mittleider J A, et al. High rotational-rate rotor with high-temperature superconducting bearings. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2009, 19: 2078–2082
- 25 Werfel F N, Floegel-Delor U, Rothfeld R, et al. Superconductor bearings, flywheels and transportation. *Supercond Sci Technol*, 2012, 25: 014007
- 26 Werfel F N, Floegel-Delor U, Riedel T, et al. HTS magnetic bearings in prototype application. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2010, 20: 874–879
- 27 Werfel F N, Floegel-Delor U, Riedel T, et al. Towards high-capacity HTS flywheel systems. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2010, 20: 2272–2275
- 28 Hao A, Wang Q, Li X, et al. Research on fault of suspension system in permanent magnetic and electromagnetic hybrid high speed maglev train. In: *Proceedings of 2014 Prognostics and System Health Management Conference*. 2014, 173–177
- 29 Nishio R, Ikeda M, Sasaki R, et al. Study on control method of running velocity for the permanent magnet-HTSC hybrid magnetically levitated conveyance system. *Physica C*, 2011, 471: 1492–1496
- 30 Ohashi S, Nishio R, Hashikawa T. Interaction between propulsion and levitation system in the HTSC-permanent magnet conveyance system. *Physica C*, 2010, 470: 1768–1771
- 31 Ohashi S, Dodo D. Influence of the propulsion system on the levitation characteristics of the HTSC-permanent magnet hybrid magnetically levitated system. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2007, 17: 2083–2086
- 32 Brandt E H. Levitation in physics. *Science*, 1989, 243: 349–355
- 33 Sun R X, Zheng J, Li J P, et al. Dynamic characteristics of the manned hybrid maglev vehicle employing permanent magnetic levitation (PML) and superconducting magnetic levitation (SML). *IEEE Trans Appl Supercond*, 2019, 29: 3600705
- 34 Si S, Zheng J, Zheng B, et al. Levitation performance of different bulk YBaCuO arrays above a permanent magnet guideway for HTS maglev systems. *J Alloys Compd*, 2017, 705: 301–308
- 35 Zheng J, Wang X R, Wang J S. Dependence of levitation stability of the YBaCuO bulk above an NdFeB guideway on field-cooled position. *Chin J Low Temp*, 2005, 27: 165–169
- 36 Ainslie M D, Fujishiro H. Modelling of bulk superconductor magnetization. *Supercond Sci Technol*, 2015, 28: 053002
- 37 Zheng J, Huang H, Zhang S, et al. A general method to simulate the electromagnetic characteristics of HTS maglev systems by finite element software. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2018, 28: 3600808
- 38 Liao H P, Zheng J, Huang H, et al. Simulation and experiment research on the dynamic levitation force of bulk superconductors under a varying external magnetic field. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2019, 29: 3600805
- 39 Bassani R. Earnshaw (1805–1888) and passive magnetic levitation. *Meccanica*, 2006, 41: 375–389
- 40 Choi K B, Cho Y G, Shinshi T, et al. Stabilization of one degree-of-freedom control type levitation table with permanent magnet repulsive forces. *Mechatronics*, 2003, 13: 587–603

Summary for “高温超导-永磁混合悬浮车基本系统的理论模型与实验”

Theoretical model and experiment of the hybrid Maglev vehicle employing high temperature superconducting magnetic levitation and permanent magnetic levitation

Nan Chen¹, Yang Chen², Ruixue Sun¹, Jun Zheng^{1*}, Xinxin Zheng¹ & Zigang Deng¹

¹ State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

² School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

* Corresponding author, E-mail: jzheng@swjtu.edu.cn

The Maglev vehicle, widely considered as a promising transportation type, has distinct characteristics, such as high speed, environmental protection, non-contact operation and distributed load and so on. According to the principle of magnetic levitation technology, it can be divided into four types: Permanent magnet levitation (PML), electromagnetic levitation (EML), electrodynamic levitation (EDL) and superconducting magnetic levitation (SML). Among four Maglev technologies, both the SML with high temperature superconducting (HTS) bulks and the PML with conventional permanent magnets belong to the passive levitation mechanisms, and both of them need permanent magnet track. Due to the strong magnetic properties of permanent magnet materials, the load capacity of the PML can reach 3–6 t/m, but requires additional guidance controls, while the SML with the unique HTS flux-pinning effect can realize self-stable levitation with little active control. Therefore, considering the different levitation characteristics of the SML and the PML above the permanent magnet track, their potential hybrid application can achieve a larger load capacity and a bigger levitation gap at the same time.

In the paper, a new SML-PML hybrid Maglev method and the corresponding theoretical models are proposed. Firstly, simulation models of the PML module and the SML module were built by finite element software. The simulation results show the different levitation performances of the two Maglev components. As to the SML module, it vertically behaves as the levitation force within the levitation height of 10–15 mm, and always achieves passive stable along the lateral direction. As to the PML module, the levitation force is relatively bigger at the calculated height of 20–60 mm, but the lateral force increases as the levitation height decrease and increases with the lateral displacement. It implies that the SML guidance capability should cover the PML lateral force at first. Hence, according to the Earnshaw theorem, the load capacity in typical working cases of the hybrid Maglev system was predicted from the simulation data. Considering the further lateral stability and the comprehensive levitation force utilization, the optimal passive stable working range and the lateral reversible range were discussed, which provide the theoretical basis for the design of the hybrid Maglev vehicle prototype.

Then, based on the real magnet tracks of the HTS Maglev ring test line, the “Super-Maglev”, in our group, a new manned hybrid Maglev vehicle prototype employing the PML and the SML modules was manufactured for carrying one passenger. In the designed two-layer Maglev frame, the linear bearings composed of the linear guide rails and the sliders are employed for vertical decoupling to guarantee the position difference of the SML and PML modules. At the same time, the lateral coupling keeps rigid since the lateral unbalance is covered by the SML module. This easy and feasible mechanical coupling way enhances the matching complementarity of the lateral recoverability of the two Maglev components. Compared with the “Super-Maglev” performance under the same working condition, the load capacity of the hybrid Maglev vehicle was increased by 17% and the cost input was lower compared with the price of one single on-board HTS bulk. Finally, static loading experiments and dynamic characteristics tests verified that the hybrid Maglev vehicle has the advantages of strong load capacity, simple structure and low cost. This work provides a new technical scheme for future Maglev transportation applications.

high temperature superconducting bulk, superconducting magnetic levitation, permanent magnet levitation, hybrid magnetic levitation

doi: [10.1360/TB-2019-0613](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0613)