

# 超导电动磁浮列车电磁特性及悬浮稳定性控制

王小农<sup>1,2</sup>, 黄靖宇<sup>1,3</sup>

(1. 同济大学 国家磁浮交通工程技术研究中心, 上海 201804; 2. 成都航利(集团)实业有限公司, 四川 成都 611937;

3. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 超导电动磁浮列车运行过程中电磁阻尼较小, 借助列车直线同步电机牵引控制, 设计悬浮稳定性控制系统, 为列车的悬浮稳定提供一种技术手段。以 MLX01 型超导电动磁浮列车为研究对象, 结合单个转向架与地面线圈组成结构的场-路-运动耦合数值模型, 揭示了超导电动磁浮列车的悬浮特性。研究了超导电动磁浮列车超导磁场强度、悬浮位移、运行速度以及标准空气气隙之间的关系特性, 分析了不同超导磁场强度和标准空气气隙下单个转向架悬浮方向电磁弹簧系数变化规律。采用矢量控制策略实现了超导磁浮列车直线同步电机直轴和交轴分量的解耦, 建立了直轴电流与悬浮力之间的数值表达式, 设计了悬浮稳定性控制结构, 并采用状态反馈实现悬浮系统的极点配置。通过对比采用悬浮稳定性控制结构前后转向架平衡位移响应, 证明了采用悬浮控制结构的有效性。研究结果表明, 采用悬浮稳定性控制系统可有效抵抗外部干扰, 维持列车的悬浮稳定, 也可进一步提高列车的乘坐舒适性。

**关键词:** 超导电动磁浮列车; 牵引特性; 悬浮特性; 悬浮控制系统

中图分类号: TM26

文献标志码: A

## Electromagnetic Characteristics and Levitation Stability Control of Superconducting Electrodynamic Maglev Train

WANG Xiaonong<sup>1,2</sup>, HUANG Jingyu<sup>1,3</sup>

(1. National Maglev Transportation Engineering R&D Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Chengdu Hangli Industrial Co., Ltd., Chengdu 611937, China; 3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The electromagnetic damping of the superconducting electrodynamic maglev train is low during the operation. With the assistance of the propulsion

control of the linear synchronous motor, a levitation stability control system is designed for a technical guarantee for the levitation stability of the train. Taking the superconducting electrodynamic maglev train of the MLX01 as the research object, combined with the field-circuit-motion coupling numerical model composed of a single bogie and ground coils, the levitation characteristics of the superconducting electrodynamic maglev train were revealed. The relationship between superconducting magnetic field strength, levitation displacement, running speed and standard air gap were studied. Analysis was made of the variation law of the electromagnetic spring coefficient in the levitation direction of a single bogie under different superconducting magnetic field strength and standard air gaps. The vector control strategy was adapted to analyze the linear synchronous motor of the superconducting electrodynamic maglev train to realize the decoupling of the components of the direct axis and the quadrature axis, and the numerical expression between the direct axis current and the levitation force was also established. A levitation stability control system was designed, and state feedback is used to realize the pole configuration of the levitation system. The balance displacement response of bogie applied before and after the levitation stability control system were compared, which proved the effectiveness of the levitation control structure. The research results show that the levitation stability control system can effectively resist external disturbances, maintain the levitation stability of the train, and further improve the ride comfort of the train.

**Keywords:** superconducting electrodynamic maglev train; propulsion characteristics; levitation/guidance characteristics; levitation control system

收稿日期: 2022-10-31

第一作者: 王小农, 工学博士, 主要研究方向为高速磁浮列车稳定性控制。E-mail: xiaonongwang\_work@163.com

通信作者: 黄靖宇, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为高速磁浮交通系统理论和应用。

E-mail: huangjingyu@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

高速磁浮列车具有转弯半径小,爬坡能力强的特点,成为21世纪理想的高速及超高速大客运交通工具<sup>[1-2]</sup>。超导电动型(EDS)磁浮列车作为当前相对成熟的磁浮技术之一,悬浮气隙较大,并且作为斥力系统,在力学上是自稳定的,因此超导EDS磁浮列车在高速及超高速运行条件下更具有发展优势。超导EDS磁浮列车导轨上的推进线圈(propulsion coil)和转向架两侧的超导(superconduction, SC)线圈组成的直线同步电机(linear synchronous motor, LSM)实现列车的驱动功能,而SC线圈和LG(levitation/guidance)线圈之间的电磁相互作用实现了列车的悬浮/导向功能<sup>[3]</sup>。列车速度低于 $120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,超导EDS磁浮列车产生的悬浮力较小,不足以支撑车辆的稳定悬浮,车辆依靠安装在转向架的车轮支撑行驶,造成列车运行过程中乘坐舒适性较差<sup>[4-5]</sup>。当速度大于 $120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,随着速度的提高车辆逐步自动悬浮,其稳定悬浮高度约为 $100\text{ mm}$ ,但SC线圈与LG线圈之间的无源被动电磁阻尼非常小,因此提升列车运行过程中悬浮稳定性具有重要意义。

超导EDS磁浮列车运行速度较快,为保证列车安全准确的行驶,车辆的加速、匀速、减速等运行依靠地面控制中心直接控制LSM<sup>[6-7]</sup>。因此,可借助地面中心对LSM的控制,通过设计控制结构,采用LSM辅助列车悬浮稳定,使得列车悬浮高度保持稳定状态并且可抵抗外部环境扰动的干扰。因此,需对超导EDS磁浮列车牵引控制系统和悬浮电磁特性进行分析研究。

针对超导EDS磁浮列车悬浮/导向特性,王志涛等学者揭示了电磁力随横向位移、悬浮位移的变化规律以及轨道线圈感应电流的形成机理<sup>[8]</sup>,Cai等学者计算和分析了列车发生竖向和侧向位移时列车的相关力特性<sup>[9]</sup>。Ohashi<sup>[1]</sup>等学者采用虚位移法分析了转向架结构所受的悬浮力和导向力<sup>[10]</sup>。针对超导电动磁浮列车牵引特性,Ikeda H分析了LSM牵引供电系统的结构和相关牵引技术<sup>[11]</sup>,Yamauchi等学者研究了日本山梨磁浮试验线LSM驱动系统的谐波控制问题<sup>[12]</sup>。LSM的控制策略中矢量控制逐渐成为LSM控制的重要手段<sup>[13]</sup>。本文以MLX01型超导EDS磁浮列车为研究对象。定义超导线圈和悬浮/导向线圈垂直中心之间的位移 $V$ 为“悬浮位移”。当列车产生的悬浮力和车辆自重产生的载荷平衡时,该悬浮位移值称为“平衡位移”。列车处于轨道中心时两者之间的横向中心距离称为 $S$ (standard air gap,  $S$ ), $H$ 为横向气隙偏移。

由于平衡位移值与列车速度、 $S$ 、 $H$ 及超导磁场强度 $M$ (magnetomotive force)有关,相关文献未对上述关系进行分析,同时也未对不同速度工况的悬浮/导向特性进行分析研究。

因此,本文采用矢量控制方式对超导EDS磁浮列车速度控制结构进行分析,并结合超导EDS磁浮列车的悬浮/导向特性数值变化规律,对悬浮稳定控制结构进行设计,借助LSM实现列车悬浮稳定的控制目标。

由于超导EDS磁浮列车悬浮/导向特性及电磁参数变化规律决定了列车的悬浮稳定性,因此首先基于单个转向架与LG线圈组成结构的场一路一运动耦合数值模型,研究了不同车辆运行速度工况下平衡位移分别与 $S$ 、 $H$ 、 $M$ 之间的关系特性,分析了不同速度工况下悬浮力、导向力和电磁阻力随悬浮位移和横向气隙偏移的变化特性。探讨了超导磁场强度、列车速度及平衡位移关系之间的关系特性,揭示了列车高速运行时转向架结构悬浮方向电磁弹簧系数变化规律。其次,通过对超导EDS磁浮列车牵引控制结构的分析,建立了直轴电流与悬浮力间的数值表达式,并结合电磁弹簧系数变化规律,设计了悬浮稳定性闭环控制系统。通过分析采用悬浮稳定性控制结构前后平衡位移响应,证明了采用悬浮控制结构的有效性。

## 1 超导磁浮列车悬浮/导向系统特性

MLX01型超导EDS磁浮列车横截面结构及相关参数定义如图1所示,线圈相关参数见表1。MLX01型超导EDS磁浮列车单个转向架的超导线圈按照4极2列左右同极配置,所支撑的质量为 $20\,000\text{ kg}$ <sup>[14]</sup>。转向架一侧由4个SC线圈与 $n$ 个LG线圈相互作用以产生悬浮力和导向力,单个转向架与LG线圈结构如图2所示。结合超导EDS磁浮列车动态电路模型与电感数值模型,建立超导EDS磁浮列车单个转向架场一路一运动耦合模型<sup>[15]</sup>。基于文献[15]单个转向架场一路一运动耦合模型,当超导EDS磁浮列车在直线轨道运行并处于轨道中心时,单个转向架一侧悬浮特性曲线如图3所示。由图3可知,解析计算结果与山梨磁浮试验线单个转向架一侧超导磁体在不同运行速度下受到的悬浮力与电磁阻力试验数据<sup>[16]</sup>在数值和变化趋势上较为一致,证明了所建立磁场一电路一运动耦合模型的正确性,为悬浮/导向系统特性分析奠定基础。

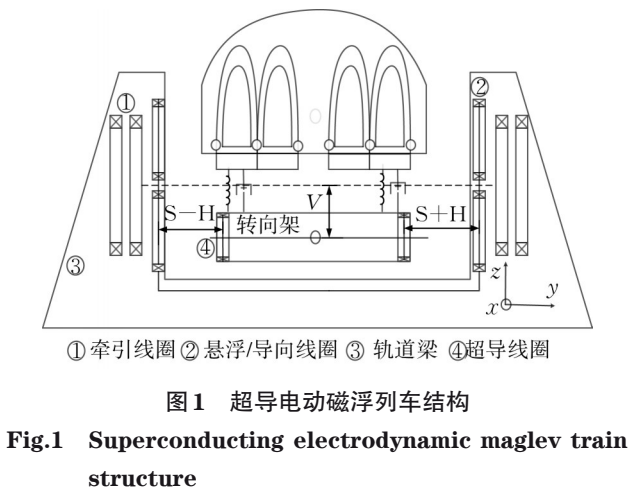
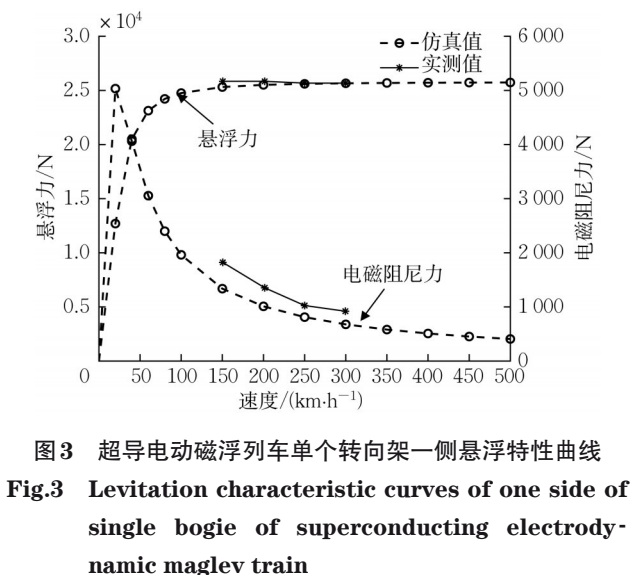
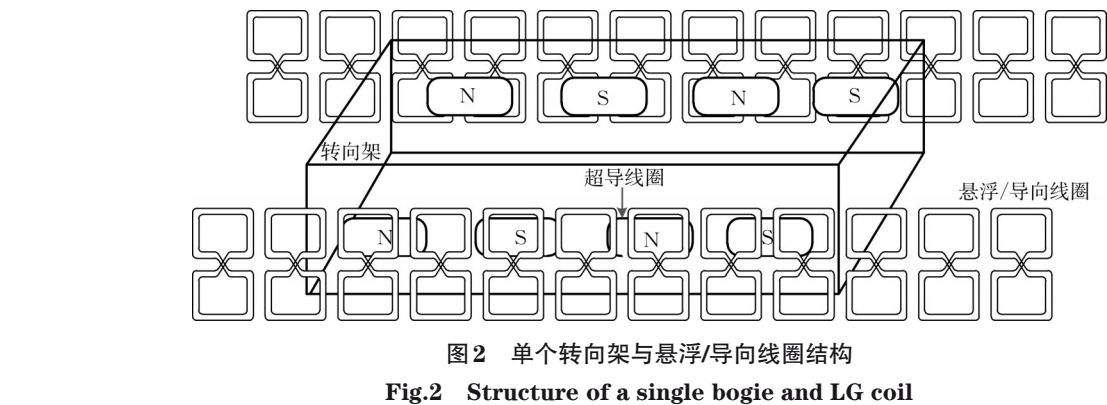


表 1 超导电动磁浮列车线圈参数		
Tab.1 Coil parameters of superconducting electrodynamic maglev train		
线圈类型	参数	数值
超导线圈	长/mm	1070
	高/mm	500
	电动势/kA	700
	极距/mm	1350
悬浮/导向线圈	长/mm	350
	高/mm	340
	横截面积/cm <sup>2</sup>	1
	匝数	24
	上下环之间的距离/mm	420
	距超导线圈的距离/mm	185
	极距/mm	450
牵引线圈	长/mm	1420
	高/mm	600
	匝数	8(内层)/10(外层)



当列车速度大于 $120\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,列车获得足够的悬浮力和导向力,无需车轮辅助运行,因此基于单个转向架场—路—运动耦合模型,当 $S=185\text{mm}$ 、 $M=700\text{kA}$ 时平衡位移、速度与 $H$ 关系如图4所示; $H=0$ 、 $M=700\text{kA}$ 时平衡位移、速度与 $S$ 关系如图5所示; $S=185\text{mm}$ 、 $H=0$ 时平衡位移、速度与 $M$ 的关系如图

6所示。当超导EDS磁浮列车偏离轨道中心和 $S$ 减小,及 $M$ 的增大使得不同速度工况下的平衡位移减小,且当速度大于 $600\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 超高速运行时,速度的增大对平衡位移的变化几乎无影响。由于超导EDS磁浮列车运行过程中左右横向气隙偏移较小,因此,假设当 $S=185\text{mm}$ 、 $H=30\text{mm}$ 时,不同速度工况下3种力随悬浮位移变化特性如图7所示。当 $S=185\text{mm}$ 、 $M=700\text{kA}$ 且列车处于轨道中心时,悬浮平衡位移值 $V=38.462\text{mm}$ ,不同速度工况下的3种力随横向气隙偏移变化特性如图8所示。由图7、图8知:①相同悬浮位移与横向气隙偏移情况下,不同时速下的电磁阻力值变化较大,而导向力与悬浮力值的变化很小,可以忽略不计;②横向气隙偏移变化与导向力大小及悬浮位移变化与悬浮力大小几乎呈线性关系,而横向气隙偏移变化与悬浮力大小及悬浮位移变化与导向力大小呈非线性关系。由于列车运行过程中采用直线同步电机进行驱动,在不同运行工况下,通过改变直线电机驱动绕组的电流大小可抵消列车电磁阻力和空气阻力的影响,因此平衡位移和横向气隙偏移变化对整个列车的稳定性运行具有至关重要的作用。



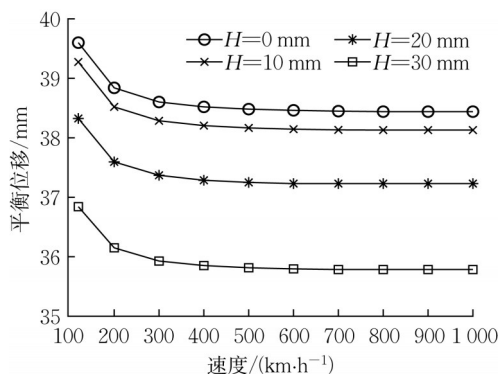


图4  $S=185\text{mm}$ ,  $M=700\text{kA}$  时平衡位移和速度与横向气隙偏移关系

Fig.4 Relationship between balance displacement, velocity & lateral air gap offset when  $S = 185\text{mm}$ ,  $M = 700\text{kA}$

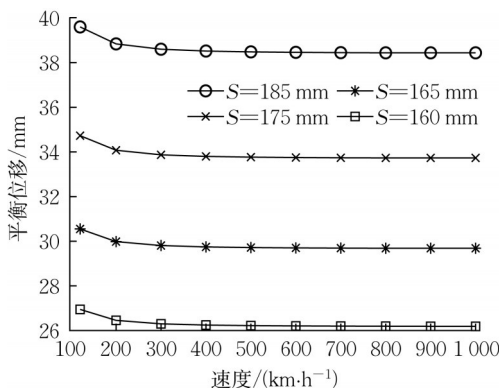


图5  $H=0\text{mm}$ ,  $M=700\text{kA}$  时平衡位移和速度与标准空气隙关系

Fig.5 Relationship between balance displacement, velocity & standard air gap when  $H = 0\text{mm}$ ,  $M = 700\text{kA}$

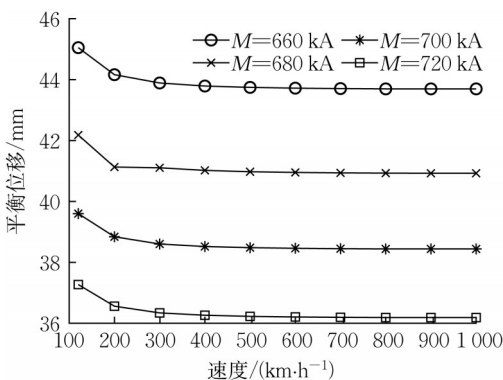
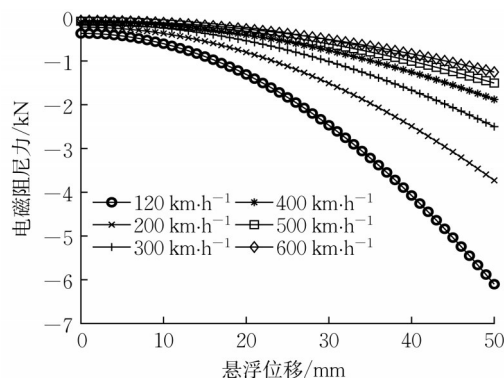


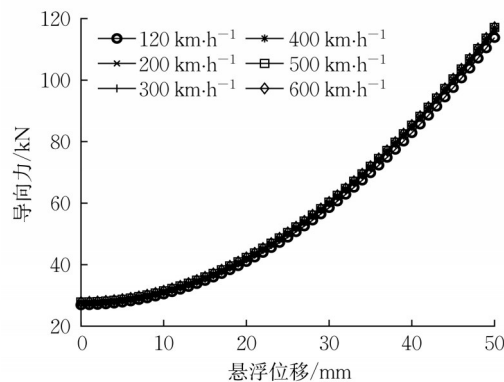
图6  $S = 185\text{mm}$ ,  $H=0\text{mm}$  时平衡位移和速度与超导线圈磁场强度关系

Fig.6 Relationship between balance displacement, velocity &  $M$  when  $S = 185\text{mm}$ ,  $H=0\text{mm}$

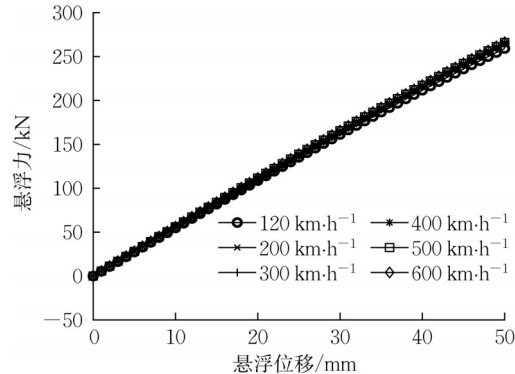
影响超导 EDS 磁浮列车运行特性的因素包括:①  $M$ ;②  $S$ ;③平衡位移;④列车运行速度。当列车无辅助



a 不同速度工况下悬浮位移与电磁阻力特性



b 不同速度工况下悬浮位移与导向力特性



c 不同速度工况下悬浮位移与悬浮力特性

图7  $S=185\text{mm}$ ,  $H=30\text{mm}$  时不同速度工况下随悬浮位移变化相关力特性

Fig.7 Force characteristics with levitation displacement change under different speed conditions when  $S = 185\text{mm}$ ,  $H = 30\text{mm}$

轮支撑运行时,列车运行速度对导向力和悬浮力的影响较小,因此超导线圈磁场强度、平衡位移、标准空气隙之间的关系对列车运行的导向和悬浮稳定性运行具有重要作用。由图7c、8b可知,横向气隙偏移变化与导向力大小及悬浮位移变化与悬浮力大小几乎呈线性关系,因此列车运行过程中当转向架发生较小偏移时,作用在转向架的电磁力与该偏移成正比,采用电磁弹簧系数代替列车运行过程中转向架所受的电磁力。当

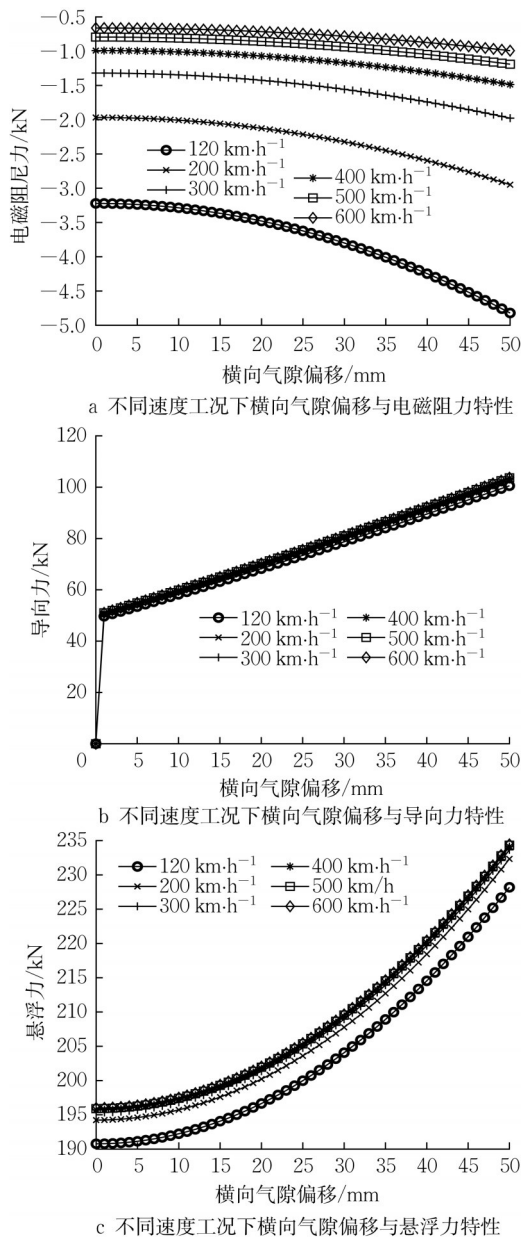


图8  $S=185mm, V=38.462mm$  时不同速度工况下随横向气隙偏移变化相关力特性

Fig.8 Force characteristics with lateral air gap offset change under different speed conditions when  $S=185mm, V=38.462mm$

$S=185mm$  时,  $v=120km \cdot h^{-1}$  和  $v=600km \cdot h^{-1}$  两种速度工况下  $M$  与平衡位移关系如图9所示。研究表明,  $M$  的增强、 $S$  的减小及列车速度的增加使得车辆获得较大的悬浮力, 进而使得平衡位移减小。由于列车稳定运行时总是处于平衡位移和轨道中心位置处, 因此研究  $M$ 、 $S$  等情形下转向架的电磁弹簧系数特性时, 列车初始位置均为对应条件下平衡位移和轨道中心位置处, 并且由于列车高速运行时速度对导向力和悬浮力的影响较小, 因此本文对列车速度  $v=600km \cdot h^{-1}$  时的电磁

弹簧特性进行分析。列车在直线轨道稳定运行时, 不同磁场强度和标准空气气隙下悬浮方向的电磁弹簧系数  $k_{zz}$  变化特性如图10所示。当标准空气气隙减小及磁场强度增大时, 由于超导线圈与地面线圈之间的磁通链增加, 使得  $k_{zz}$  增大, 并且当标准空气气隙为定值时, 磁场强度与  $k_{zz}$  几乎呈正比例关系。

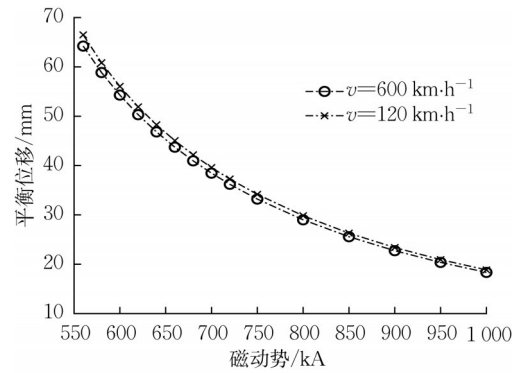


图9 不同速度工况下超导磁动势与平衡位移之间的关系  
Fig.9 Relationship between  $M$  and balance displacement under different speed conditions

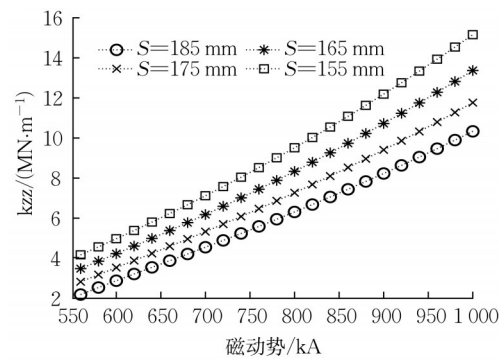


图10 不同磁场强度和标准空气气隙情形下  $k_{zz}$  变化特性  
Fig.10 Variation characteristics of  $k_{zz}$  under different  $M$  and  $S$

## 2 超导电动磁浮列车悬浮稳定性控制

### 2.1 悬浮稳定性控制数学模型

超导 EDS 磁浮列车速度控制采用变频变压 VVVF (variable voltage variable frequency) 方式, 即按照运营要求改变输入到 LSM 的电压及频率, 实现无人驾驶运行。超导 EDS 磁浮列车地面结构为保证系统的效率和功率因数, 按列车所处的位置切换供电开关实现分区供电<sup>[17]</sup>, 并确保前后列车的安全, 超导 EDS 磁浮列车分区供电示意图如图11所示。由于超导 EDS 磁浮列车产生推力的能量是由地面提供的, 所以不存在受流问题, 在高速时能产生较大的推力。超导 EDS 磁浮列车控制系统总体结构可分为中央控制子系统、

沿线分散控制子系统以及车载移动控制子系统<sup>[18]</sup>。本文采用矢量控制方式对超导EDS磁浮列车速度控制结构进行设计,实现直轴和交轴分量的解耦,超导EDS磁浮列车牵引控制结构如图12所示,其中 $v$ 、 $\Delta v$ 分别为列车速度以及速度变化量、 $\tau$ 为车载超导磁体的极距。速度环的作用主要是控制列车的速度,实现调速和稳速的目的,电流环用于加快系统的调节过程,使得地面轨道线圈中电流更好的接近给定的电流矢量,而SVPWM技术用于控制逆变器实现电流的输出。

超导EDS磁浮列车牵引控制过程中仅控制 $q$ 轴电流可以实现牵引力大小的调节,进而完成对速度的控制,而将 $d$ 轴参考电流设置为0。基于LSM矢量控制,利用 $d$ 轴电流,设计控制结构对超导EDS磁浮列车的悬浮力进行控制,为超导EDS磁浮列车稳定悬浮提供一种有效方式。基于能量守恒定律,超导EDS磁浮列车地面牵引线圈与车载超导磁体之间的能量表达式见式(1),其中 $i_j(j=a,b,c)$ 为通入牵引线圈

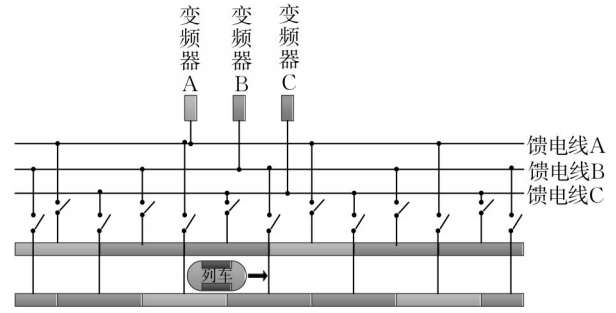


图11 超导电动磁浮列车供电示意图

Fig. 11 Schematic diagram of power supply for superconducting electrodynamic maglev train

中的三相电流, $\psi_k(k=a,b,c)$ 为对应的磁链, $i_k(k=d,q,0)$ 与 $\psi_k(k=d,q,0)$ 为dq0坐标系下对应的电流和磁链。因此,转向架在悬浮方向LSM产生的悬浮力 $F_{LSM}$ 表达式见式(2),其中 $\mu_0$ 为真空磁导率, $\Delta z$ 为悬浮方向的平衡位移的变化量, $N_a$ 为内侧与外侧牵引线圈的平均值。

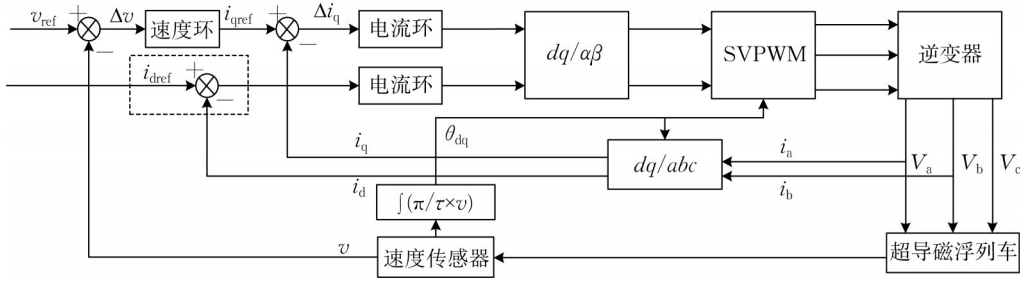


图12 超导电动磁浮列车牵引控制系统

Fig. 12 Traction control systems of superconducting electrodynamic maglev train

$$W = \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$F_{LSM} = \frac{\partial W(i_d, i_q, i_0, \Delta z)}{\partial z} = i_d \frac{d\psi_d}{dz} + i_q \frac{d\psi_q}{dz} + i_0 \frac{d\psi_0}{dz} \approx \sqrt{\frac{2}{3}} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_m \Psi_{km} \sin(\alpha_m \Delta z) k_d(x) i_d \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} \Psi_{km} = 18\mu_0 \frac{\beta_{km}}{\alpha_k \alpha_m} \sin(0.71\alpha_k) \sin(0.3\alpha_m) \times a_s(k, m) e^{-0.095\beta_{km}} \frac{\sin(1.35N_a \alpha_k)}{\sin(2.7\alpha_k)} \cos(\alpha_m \Delta z) \\ \alpha_k = \pi k/L, \alpha_m = \pi m/W, \beta_{km} = \sqrt{\alpha_k^2 + \alpha_m^2} \\ a_s(k, m) = \frac{1.12 \times 10^7}{\pi^2 km} \sin(0.535\alpha_k) \times \sin(0.25\alpha_m) \frac{\sin(6.4\alpha_k)}{\cos(0.675\alpha_k)} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} k_d(x) = \frac{8}{9} e^{0.023\beta_{km}} \left\{ \cos \frac{\pi x}{1.35} s_{u1} + \cos \left( \frac{\pi x}{1.35} - \frac{2\pi}{3} \right) s_{v1} + \cos \left( \frac{\pi x}{1.35} + \frac{2\pi}{3} \right) s_{w1} \right\} + \\ \frac{10}{9} e^{-0.023\beta_{km}} \left\{ \cos \frac{\pi x}{1.35} s_{u2} + \cos \left( \frac{\pi x}{1.35} - \frac{2\pi}{3} \right) s_{v2} + \cos \left( \frac{\pi x}{1.35} + \frac{2\pi}{3} \right) s_{w2} \right\} \\ s_{u1} = \sin\{\alpha_k(x + 2.025)\}; s_{u2} = \sin\{\alpha_k(x - 0.675)\}; s_{w1} = \sin\{\alpha_k(x + 0.225)\} \\ s_{w2} = \sin\{\alpha_k(x - 2.475)\}; s_{v1} = \sin\{\alpha_k(x - 1.575)\}; s_{v2} = \sin\{\alpha_k(x + 1.125)\} \end{cases} \quad (4)$$

假设超导EDS磁浮列车车载超导磁体安装有位置传感器和速度传感器,可时刻检测悬浮位移变化值 $\Delta z$ 和转向架速度变化特性,相关结构及位置如图13所示。超导EDS磁浮列车悬浮动态平衡方程见式(5),其中 $m$ 为列车的质量、 $F_{LG}$ 为LG线圈产生的悬浮力。根据列车悬浮动态平衡方程,则系统的状态空间表达式见式(6),其中 $k_l^l$ 为轨道左侧LSM的悬浮力系数, $k_l^r$ 为轨道右侧LSM的悬浮力系数, $g$ 为重力系数,取 $9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。空间状态法中,一般采用状态反馈或输出反馈实现系统的极点配置,并且由于悬浮系统安装有位置传感器和速度传感器可时刻获取系统的内部状态变量,因此采用状态反馈实现悬浮系统的极点配置。将系统状态变量 $x$ 乘以一定的反馈系数,将其反馈到系统的输入端,并与系统的参考输入形成信号作为系统的输入对悬浮系统进行控制,并且为消除悬浮控制系统的静态误差,悬浮位移值参考输入和输出之间加入积分环节。因此,超导EDS磁浮列车悬浮稳定性控制结构如图14所示,其中 $k_1$ 、 $k_2$ 反馈系数, $k_3$ 为积分放大系数。图14虚线框所示为状态反馈环节,则悬浮控制系统的线性状态反馈控制律 $U$ 见式(7), $\Delta z_{\text{ref}}$ 为列车稳定悬浮时的平衡位移参考值。由式(6)与式(7)可知状态反馈系统的特征方程表达式见式(8)。

$$m \frac{d^2 \Delta z}{dt} = mg - F_{\text{LSM}} - F_{\text{LG}} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + d \\ y = Cx \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{式中}, A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -k_{zz}/m & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ -(k_l^l + k_l^r)/m \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}, x = (\Delta z, d\Delta z/dt)^T, u = i_d, d = (0 \quad g)^T。$$

$$\dot{U} = \begin{pmatrix} k_1 \dot{\Delta z} & k_2 \frac{d^2 \Delta z}{dt^2} \\ -k_3 (\Delta z_{\text{ref}} - \Delta z) \end{pmatrix}^T \quad (7)$$

$$s^3 + \frac{k_2(k_l^l + k_l^r)}{m} s^2 + \frac{[k_1(k_l^l + k_l^r) + k_{zz}]}{m} s + \frac{k_3(k_l^l + k_l^r)}{m} = 0 \quad (8)$$

根据超导EDS磁浮列车悬浮稳定性控制结构,需对 $k_1$ 、 $k_2$ 及 $k_3$ 进行参数整定。设置悬浮系统的闭环极点为 $p_{1,2} = -5 \pm j20$ ,  $p_3 = -10$ ,则系统的闭环特征方程见式(9)。基于第1节超导EDS磁浮列车EDS悬浮/导向系统分析可知,当 $S=185 \text{ mm}$ 、 $M=700 \text{ kA}$ 时,  $v=600 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 情形下平衡位移值为 $38.46 \text{ mm}$ ,  $k_{zz}=5.089 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,因此可得悬浮系统的反馈增益参数值分别为 $k_1=0.52 \times 10^6$ 、 $k_2=0.89 \times 10^4$ 及 $k_3=1.9 \times 10^6$ 。

$$D = s^3 + 20s^2 + 525s + 4250 \quad (9)$$

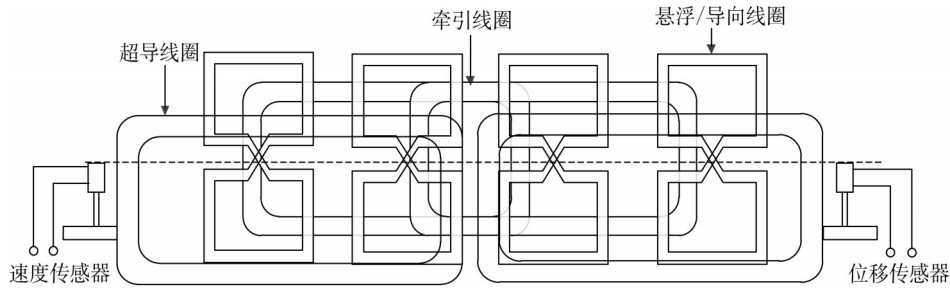


图13 超导电动磁浮列车不同线圈结构位置示意

Fig. 13 Schematic diagram of different coil positions of superconducting electrodynamic maglev train

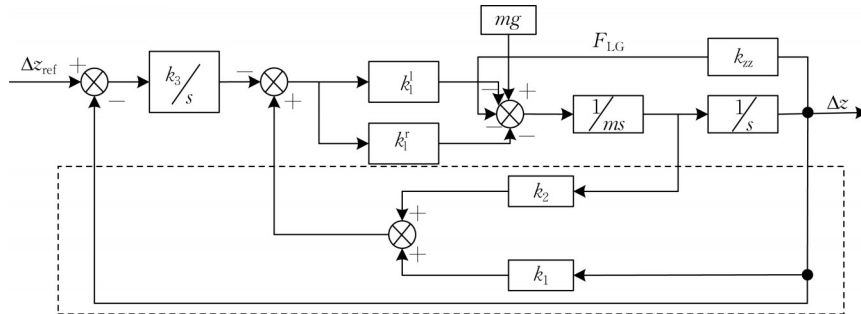


图14 超导电动磁浮列车悬浮稳定性控制系统

Fig. 14 Levitation stability control systems of superconducting electrodynamic maglev train



## 2.2 悬浮稳定性控制实例研究

当 $v=600\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、平衡位移参考值为 $38.46\text{mm}$ 以及列车受到外部脉冲力时,未利用LSM悬浮稳定性控制系统情形下转向架的平衡位移响应曲线如图15所示。图15表明,当列车运行过程中受到外部脉冲力作用时,平衡位移变化处于等幅震荡状态,无法有效收敛。采用Simulink搭建2.1节悬浮稳定性控制系统模型,且施加外部脉冲力作用情形下转向架的平衡位移变化响应如图16所示。图16表明,列车受到外部脉冲力作用下平衡位移发生明显变化,但由于LSM悬浮稳定性控制系统的作用,平衡位移响应快速收敛,证明了悬浮控制系统的有效性。由于LG地面轨道线圈的影响,列车运行过程中所受的悬浮力存在周期性波动,因此,定义列车运行过程中的悬浮力波动定义见式(10),其中, $f_{\text{Pulse}}$ 为悬浮力波动幅值、 $\tau_{\text{LG}}$ 为LG线圈的极距、 $v$ 为列车速度、 $\theta$ 为与列车位置有关的初始相位角。当 $f_{\text{Pulse}}=10\text{kN}$ 、 $v=600\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,即列车运行过程中受到外部悬浮力周期性波动影响时,转向架平衡位移变化及其速度响应曲线如图17所示。图17表明,当列车处于悬浮稳定状态时,由于悬浮控制系统的作用,使得悬浮方向力的波动对于列车的平衡位移变化影响较小,可有效抵抗外部干扰,维持列车的悬浮稳定,进一步提高列车的舒适性等性能。

$$F_{\text{Pulse}} = f_{\text{Pulse}} \sin\left(2\pi \frac{v}{\tau_{\text{LG}}} t + \theta\right) \quad (10)$$

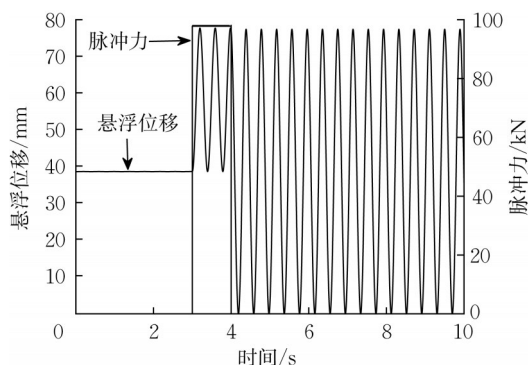


图15 无悬浮控制系统作用下转向架平衡位移响应曲线  
Fig. 15 Balance displacement response curve of bogie without levitation control system

## 3 结论

本文以MLX01型超导电动磁浮列车为研究对象,建立了单个转向架与地面线圈组成结构的场一路一运动耦合数值模型,揭示了超导电动磁浮列车的悬浮特性。研究了影响超导电动磁浮列车稳定运

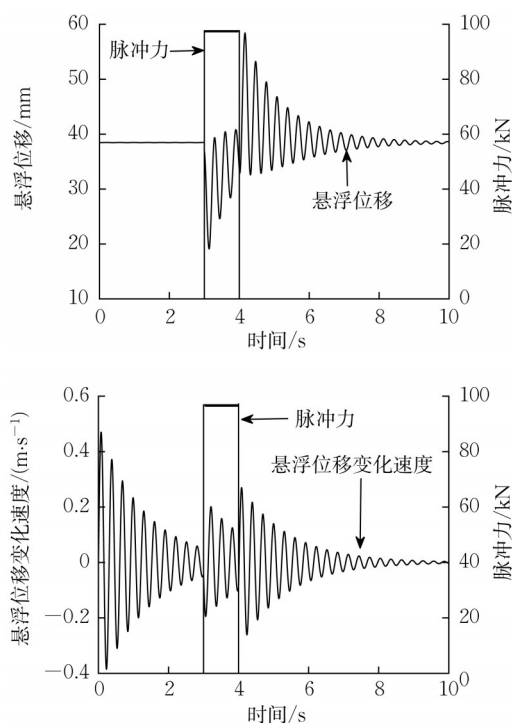


图16 悬浮控制系统作用下转向架平衡位移响应曲线  
Fig. 16 Balance displacement response curve of bogie under levitation control system

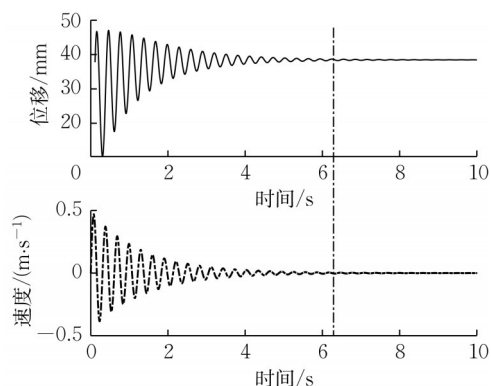


图17 外部悬浮力波动作用下转向架平衡位移变化响应曲线  
Fig. 17 Balance displacement response curve of bogie under external levitation force fluctuation

行因素之间的数值关系,并分析了单个转向架悬浮方向电磁弹簧系数变化规律。借助列车直线同步电机牵引控制,设计悬浮稳定性控制系统,通过对比分析不同情形下采用悬浮稳定性控制结构前后平衡位移响应及位移变化速度响应,证明了采用悬浮控制结构的有效性,为列车的悬浮稳定提供一种技术手段。主要包括以下结论:

(1)当超导电动磁浮列车偏离轨道中心、标准空气气隙减小,以及超导磁场强度增大三种情况下,平衡位移逐渐减小,并且列车速度大于 $600\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,速度的变化对平衡位移的影响可以忽略;



(2)相同悬浮位移与横向气隙偏移情况下,不同时速下的电磁阻力值变化较大,而导向力与悬浮力值的变化很小,可以忽略不计。同时,横向气隙偏移变化与导向力大小及悬浮位移变化与悬浮力大小几乎呈线性关系,而横向气隙偏移变化与悬浮力大小及悬浮位移变化与导向力大小呈非线性关系;

(3)当标准空气气隙减小及磁场强度增大时,使得悬浮方向电磁弹簧系数增大,并且当标准空气气隙为定值时,磁场强度与悬浮方向电磁弹簧系数几乎呈正比例关系;

(4)由于悬浮控制系统的作用,使得列车运行过程中悬浮方向力的波动化对于平衡位移变化影响较小,可有效抵抗外部干扰,维持列车的悬浮稳定;

本文的相关研究成果可为EDS超导电动磁浮列车的悬浮稳定性能的提升提供一种思路和方法。

#### 作者贡献声明:

王小农:模型构建,程序编写,论文撰写;

黄靖宇:研究方向提出,学术指导,论文指导。

#### 参考文献:

- [1] 秦伟,范瑜,朱熙,等.永磁电动式磁悬浮装置的研究[J].电机与控制学报,2011,15(7):77.  
QIN Wei, FAN Yu, ZHU Xi, *et al.* Analysis of permanent-magnet electro-dynamic maglev device [J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(7):77.
- [2] TAKAO K, TAKAHASHI K. Vehicles for superconducting maglev system on yamanashi test line [J]. Railway Technical Research Institute Quarterly Reports, 1994, 35:101.
- [3] MURAI T. Characteristics of LSM combined propulsion, levitation and guidance [J]. Electrical Engineering in Japan, 1995, 115(4):134.
- [4] CAI Y, CHEN S S. Dynamic characteristics of magnetically-levitated vehicle systems [J]. Applied Mechanics Reviews, 1997, 50(11):647.
- [5] LI J. Normal force analysis on a high temperature superconducting linear synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22 (3) : 5200304.
- [6] 陈殷,张昆仑.板式双边永磁电动悬浮电磁力计算[J].电工技术学报,2016,31(24):150.  
CHEN Yin, ZHANG Kunlun. Calculation of electromagnetic force of plate type null double side permanent magnet electrodynamic suspension [J]. Transactions of China Electrotechnical Society. 2016,31(24): 150.
- [7] 李春生,杜玉梅,夏平畴,等.直线型 Halbach 磁体和导体板构成的电动式磁悬浮系统的分析及实验[J].电工技术学报,2009,24(1):18.  
LI Chunsheng, DU Yumei, XIA Pingchou, *et al.* Analysis and experimental testing of eds maglev with linear halbach and conducting sheet [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 18.
- [8] 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.  
WANG Zhitao, CAI Yao, GONG Tianyong, *et al.* Study on characteristics of superconducting electric levitation train based on field road motion coupling model [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2019, 39 (4): 1162.
- [9] CAI Y, MA G, WANG Y, *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.
- [10] OHASHI S, UEDA N. Influence of the damper coil system on the levitation characteristics in the superconducting magnetically levitated system in case of sc coil quenching [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11):1.
- [11] DURGA R K, KUSHWAHA H S, VERMA A K, *et al.* Simulation based reliability evaluation of AC power supply system of Indian Nuclear Power Plant [J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 2007, 24(6):628.
- [12] YAMAUCHI Y, TANITSU H, KITANO J, *et al.* Harmonics control of the 20 mva pwm inverter fed lsm drive systemfor the yamanashi maglev test line [C]// Power Conversion Conference-nagaoka. Tokyo: IEEE, 1997: 156-162.
- [13] 臧文彬.基于电流源逆变器的三相永磁同步电机控制系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.  
ZANG Wenbin. Research on three-phase permanent magnet synchronous motor control system based on current source inverter [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2021.
- [14] KEN, WATANABE, HIROSHI, *et al.* A study of vibration control systems for superconducting maglev vehicles (vibration control of lateral and rolling motions) [J]. Journal of System Design and Dynamics, 2007, 1(3):593.
- [15] WANG Xiaonong, HUANG Jingyu. Study on electromagnetic relationship and dynamic characteristics of superconducting electrodynamic maglev train on curved [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(6):6146.
- [16] KUWANO K, IGARASHI M, KUSADA S, *et al.* The running tests of the superconducting maglev using the hts magnet [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 2125.
- [17] RAO K D, KUSHWAHA H S, VERMA A K, *et al.* Simulation based reliability evaluation of AC power supply system of Indian Nuclear Power Plant [J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 2007, 24(6):628.
- [18] ONO M, KOGA S, OHTSUKI H. Japan's superconducting maglev train [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2002, 5(1):9.