

# 超导电动磁浮列车用长定子直线同步电机 电磁性能分析

王津<sup>1,2</sup>, 葛琼璇<sup>1,2</sup>, 赵鲁<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院电工研究所 高密度电磁动力与系统全国重点实验室, 北京 100190;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 超导电动磁浮列车的动力系统采用长定子直线同步电机, 其运行稳定性易受轨道不平顺、曲线通过及侧风等扰动影响, 导致列车姿态发生变化, 超导磁体与牵引线圈之间的气隙波动会改变电磁力特性。为探究气隙变化对牵引性能的作用机制, 首先基于空间谐波法建立了超导直线同步电机的数学模型, 并通过有限元仿真验证模型的准确性; 进而系统分析了垂直、横向、俯仰、侧滚和偏航等多自由度扰动下电机气隙磁场与牵引力的动态响应特性, 揭示了气隙变化与牵引力波动的关联规律。研究成果可为超导磁浮列车牵引系统的主动控制策略设计与动态稳定性优化提供理论依据。

**关键词:** 电动悬浮; 直线同步电机; 空间谐波法; 有限元法; 超导磁体

**中图分类号:** TM28      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd26529

## Electromagnetic Performance Analysis of Long-stator Linear Synchronous Motors for Superconducting Electrodynamic Suspension Maglev Trains

WANG Jin<sup>1,2</sup>, GE Qiongxuan<sup>1,2</sup>, ZHAO Lu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of High Density Electromagnetic Power and Systems, Institute of Electrical Engineering,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100049, China)

**Abstract:** The power system of the superconducting electrodynamic suspension maglev train adopts a long-stator linear synchronous motor. Its operational stability is susceptible to disturbances such as uneven tracks, curve passage, and crosswinds, which result in alterations to the train's attitude. The air gap between the superconducting magnet and the propulsion coils fluctuates, thereby altering the electromagnetic force characteristics. To explore the mechanism of the effect of air gap variation on traction performance, firstly, a mathematical model of the superconducting linear synchronous motor was established based on the space harmonic method and verified the accuracy of the model through finite element analysis. Furthermore, the dynamic response characteristics of the motor air gap magnetic field and traction force under multi-degree-of-freedom disturbances, including vertical, lateral, pitch, roll, and yaw conditions were systematically analyzed, the correlation between air gap variations and traction force fluctuations was revealed. The findings provide a theoretical foundation for developing active control strategies and optimizing dynamic stability in the superconducting electrodynamic suspension maglev train.

**Key words:** electrodynamic suspension (EDS); linear synchronous motor; space harmonic method; finite element method; superconducting magnets

随着全球经济的快速发展, 社会对高速交通的需求日益增长。传统铁路受制于轮轨系统的

黏着极限, 难以满足高速运输的要求。与传统铁路相比, 磁悬浮列车与轨道无直接接触, 彻底摆

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2023YFB4302501-02)

**作者简介:** 王津(1994—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大功率电力电子与直线驱动, Email: wj2021syg@mail.iee.ac.cn

**通讯作者:** 葛琼璇(1967—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为高压大功率变流器控制技术、高性能电机牵引控制技术,  
Email: gqx@mail.iee.ac.cn

脱了轮轨的束缚,凭借其环保、高速、舒适和可靠等优点,成为高速运输的重要选择。目前,德国的电磁悬浮(electromagnetic suspension, EMS)和日本的电动悬浮(electrodynamic suspension, EDS)列车分别达到了505 km/h和603 km/h的高速<sup>[1-4]</sup>。其中,EDS技术是目前唯一实现600 km/h载人测试的技术,其具有较大的极距和气隙以及牵引线圈无铁损等优势,成为未来高速轨道交通发展的主要焦点之一。

随着超导电动悬浮技术的发展,越来越多的学者开始关注其应用与研究。目前研究主要集中在悬浮系统的电磁特性和结构的优化。Takenori等<sup>[5]</sup>研究了超导磁体在横向和垂直偏移时的悬浮、阻力和导向力的影响。王志涛等<sup>[6]</sup>基于动态电路理论,建立悬浮系统的等效电路模型,研究电动悬浮列车的动态运行特性。胡道宇等<sup>[7]</sup>提出基于振动能量法的超导电动悬浮阻尼特性评价方法,详细分析超导电动垂向与导向阻尼特性的速度、振幅以及振频的相关性。Ohashi等<sup>[8]</sup>研究超导磁体失超情况下,对于转向架以及零磁通线圈的影响。Lim等<sup>[9]</sup>建立静态实验平台,研究超导磁体与零磁通线圈之间的感应电流及作用力。这些研究为增强超导EDS系统的稳定性提供了理论基础。

然而,针对超导直线同步电机的研究相对有限。赵正伟等<sup>[10-11]</sup>基于日本EDS磁悬浮列车的实际尺寸,研究了双层牵引线圈在超导磁体垂直和横向偏移下的三维电磁力特性。李婧等<sup>[12]</sup>研究了双层牵引线圈电机中超导磁体在任意位置的电磁力特性,并探讨了电机次级姿态变化对电磁力的影响。Fu等<sup>[13]</sup>建立了推进、悬浮和导向一体化的列车模型,分析超导磁体发生变化时的电磁特性。然而,这些研究主要集中在双层电枢排布电机或牵引悬浮导向一体化模型上,对于单层电枢排布电机在超导磁体多姿态变化下的影响分析尚未深入探讨。

在超导电动磁浮列车的实际运行中,外部扰动(如地面线圈铺设差异、侧风和转弯离心力等)可能导致安装在列车上的超导磁体发生五种不同的姿态变化,包括垂直、横向、俯仰、侧滚和偏航。针对这些问题,本文基于空间谐波法建立了单层电枢排布的真实尺寸超导长定子直线同步电机模型,并通过有限元模型进行验证。然后分析超导磁体在五种特殊情况下的气隙磁场变化,

计算相应的电机牵引力及其波动,揭示姿态变化对电磁特性的影响规律。

## 1 长定子直线同步电机的结构与工作原理

超导电动磁浮列车所需牵引力由长定子直线同步电机的牵引线圈和超导磁体提供,其参数如表1所示。牵引线圈为无铁心线圈,铺设在整个轨道侧壁;零磁通线圈安装在牵引线圈外靠近列车的一侧,为列车提供悬浮力和导向力;超导磁体通过转向架安装在车体两侧,列车截面如图1所示<sup>[14]</sup>。

表1 超导直线同步电机参数

| Tab.1 Parameters of superconducting linear synchronous motor |          |               |          |
|--------------------------------------------------------------|----------|---------------|----------|
|                                                              | 符号       | 描述            | 数值       |
| 牵引线圈                                                         | $a_1$    | 长度            | 755 mm   |
|                                                              | $b_1$    | 高度            | 600 mm   |
|                                                              | $N_1$    | 匝数            | 10       |
|                                                              | $I_1$    | 额定电流          | 1 000 A  |
|                                                              | $\tau_1$ | 极距            | 450 mm   |
| 超导磁体                                                         | $a_0$    | 长度            | 1 070 mm |
|                                                              | $b_0$    | 高度            | 500 mm   |
|                                                              | $N_0$    | 匝数            | 1 400    |
|                                                              | $I_0$    | 励磁电流          | 500 A    |
|                                                              | $\tau_0$ | 极距            | 1 350 mm |
|                                                              | $y_0$    | 超导磁体与牵引线圈横向偏移 | 257 mm   |
|                                                              | $z_0$    | 超导磁体与牵引线圈垂直偏移 | 0 mm     |

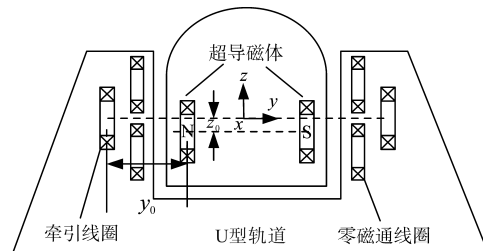


图1 EDS列车截面图

Fig.1 Cross-section of the EDS train

超导磁体与牵引线圈在超导直线电机中的排布关系如图2所示。一对超导磁体与三个牵引线圈相对应,每个牵引线圈对应电角度为120°。定义 $x$ 方向为列车的前进方向, $y$ 方向为横向方向, $z$ 方向为垂直方向。

基于空间谐波法建立超导磁体在空间的磁感应强度:

$$B = c_0 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_{mn} f_0(m,n) \cos(k_{xm}x) \cos(k_{zn}z) e^{-\lambda_{mn}y} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} c_0 = 8\mu_0 N_0 I_0 / (\tau_1 \tau_z) \\ \tau_z = k \cdot b_0 \quad k = 3 \sim 5 \\ f_0(m, n) = \frac{\sin(k_{xm} \frac{a_0}{2}) \sin(k_{zn} \frac{b_0}{2})}{k_{xm} k_{zn}} \\ k_{xm} = m \frac{\pi}{\tau_1} \quad k_{zn} = n \frac{\pi}{\tau_z} \quad m, n = 1, 3, 5, \dots \\ \lambda_{mn} = \sqrt{k_{xm}^2 + k_{zn}^2} \end{cases}$$

式中: $c_0$ 为系数; $\mu_0$ 为空气的磁导率; $\tau_z$ 为假设的 $z$ 方向超导磁体极距; $f_0(m, n)$ 为与超导线圈尺寸排列相关的函数。

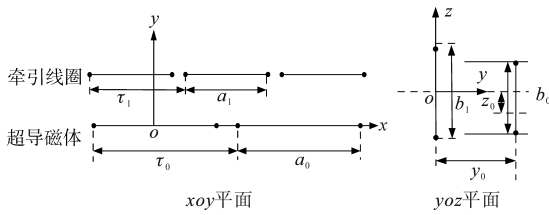


图2 牵引线圈与超导磁体排布图

Fig.2 Structure of the propulsion coils and superconducting magnets

参考图2,牵引线圈按顺序进行编号,给定速度 $v_x$ 以及起始点在第 $p$ 个线圈处,沿 $x$ 轴的线圈中心位置 $x_p$ 如下:

$$x_p = p\tau_1 + \int_{t_0}^t v_x dt \quad (2)$$

式中: $t_0$ 为初始时刻。

通过第 $p$ 个线圈的磁通量可以表示为

$$\Phi_p = \int_{x_p - a_1/2}^{x_p + a_1/2} \int_{z_0 - b_1/2}^{z_0 + b_1/2} B dx dz \quad (3)$$

基于能量法计算第 $p$ 个牵引线圈的牵引力为

$$F_p = \partial W_p / \partial x = \partial (\Phi_p I_1) / \partial x \quad (4)$$

式中: $W_p$ 为第 $p$ 个牵引线圈的能量; $I_1$ 为第 $p$ 个牵引线圈中的电流。

电机产生的牵引力不仅和超导磁体与牵引线圈的参数相关,还与两者之间的相对位置相关,当两者之间空间相对位置变化时,两者之间的磁感应强度改变,将影响牵引力的性能。

## 2 有限元模型

在ANSYS中建立了超导电动磁浮列车用长定子直线同步电机的三维有限元模型,牵引线圈按照列车运动方向布置,但有限元模型具有有限的求解域。为了加速求解过程,并更准确反映电机性能,将电机的三维有限元模型简化为最小单元,即一对超导磁体和三个牵引线圈,如图3所示。

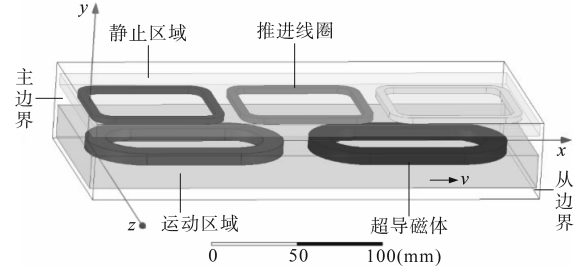


图3 超导直线同步电机三维有限元模型

Fig.3 Three-dimensional finite element model of superconducting linear synchronous motor

第1节中,基于空间谐波法构建了电机模型,本节的三维有限元模型将对其进行验证。如图4所示,基于空间谐波法和有限元模型计算的牵引线圈表面的磁感应强度约为640 mT,变化趋势相同。通过空间谐波法计算的牵引力平均值为9.5 kN,波动为2%,如图5a所示。这与三维有限元法的牵引力曲线趋势一致,并接近其平均值9.3 kN,然而有限元法的牵引力波动约为10%,如图5b所示。由于空间谐波法在计算过程中谐波含量较低,仅保留了五次、七次谐波,未考虑更高次谐波的影响,牵引力波动较小。

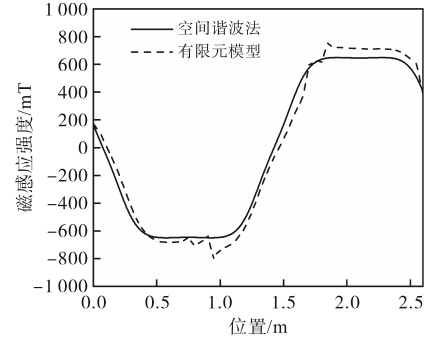


图4 空间谐波法与有限元模型计算的磁感应强度

Fig.4 The magnetic flux density calculated by space harmonic method and finite element model

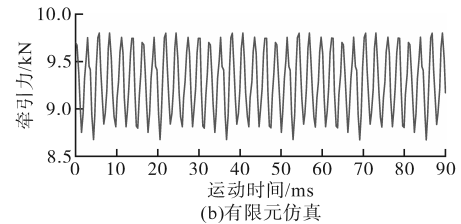
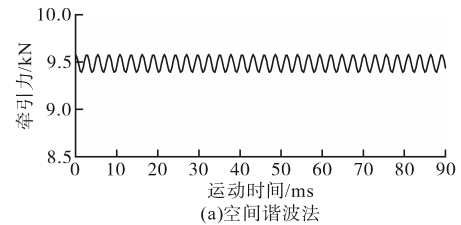


图5 空间谐波法与有限元模型计算的牵引力

Fig.5 Propulsion force calculated by space harmonic method and finite element model

### 3 五种运行条件下的长定子直线同步电机性能分析

在列车运动过程中,会出现多自由度运动,由于超导磁体位于列车上,它们将跟随列车姿态发生变化,影响超导磁体与定子的相对位置。超导磁体具有五种姿态变化:垂直、横向、俯仰、侧滚和偏航,相对位置模型如图6所示。

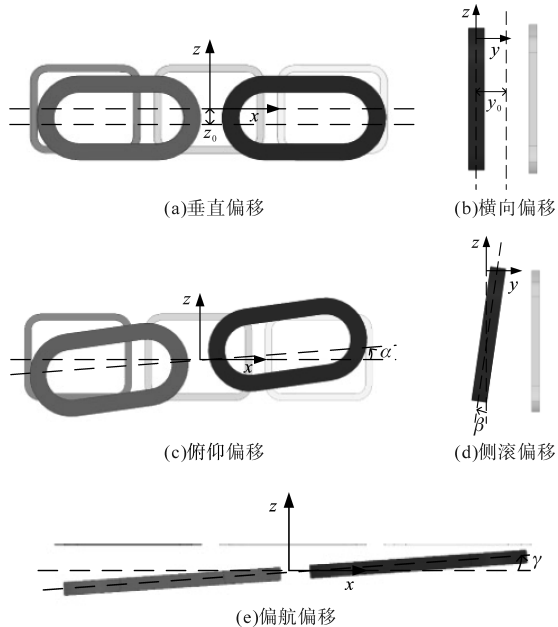


图6 不同相对位置示意图

Fig.6 Schematic diagram of different relative positions

图6中, $\alpha$ 为俯仰偏移角度; $\beta$ 为侧滚偏移角度; $\gamma$ 为偏航偏移角度。

#### 3.1 超导励磁垂直偏移工况分析

超导电动磁浮列车在运行过程中,低速时通过车轮推动列车前进,此时超导磁体的中心与牵引线圈的中心对齐,当达到起浮速度后,列车车轮将会收起,此时车体产生降落,导致超导磁体与牵引线圈中心出现垂直偏移,随着列车速度增加,受到的悬浮力增加,两者之间的垂直偏移量减小,直至列车运行稳定,垂直偏移基本恒定。列车在降落的过程中与起浮过程相反。

根据图6a所示的模型,计算长定子直线同步电机在正常条件下以及超导磁体垂直偏移为20~40 mm时的磁感应强度和牵引力及其波动。图7显示了当超导磁体垂直偏移为20~40 mm时,牵引线圈表面的磁感应强度波形。垂直偏移虽然不影响横向气隙长度,但影响有效耦合面积,中间耦合区域的磁感应强度会降低。

图8显示了长定子直线同步电机在正常条件

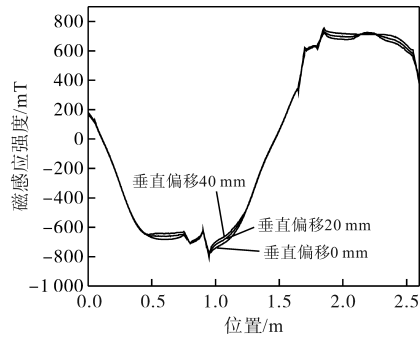


图7 不同垂直偏移对应磁感应强度

Fig.7 Magnetic flux density with different vertical offsets

下以及超导磁体垂直偏移为20~40 mm时的牵引力波形。电机牵引力的波形趋势一致,但随着超导磁体不同垂直偏移,牵引力的幅值和波动值不同。图9显示了牵引力及其波动与垂直偏移之间的关系,当超导磁体垂直偏移为20 mm时,牵引力波动值为10.22%,当垂直偏移距离为40 mm时,牵引力波动值为9%。超导磁体垂直偏移的增加导致牵引力平均值减小,同时系统在稳态运行状态下的牵引力波动减小。然而,垂直偏移越大,达到稳态运行状态所需的时间越长。

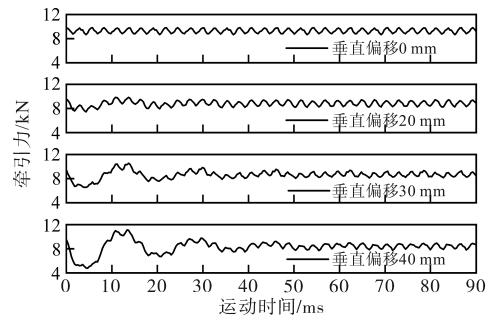


图8 不同垂直偏移对应牵引力

Fig.8 Propulsion force with different vertical offsets

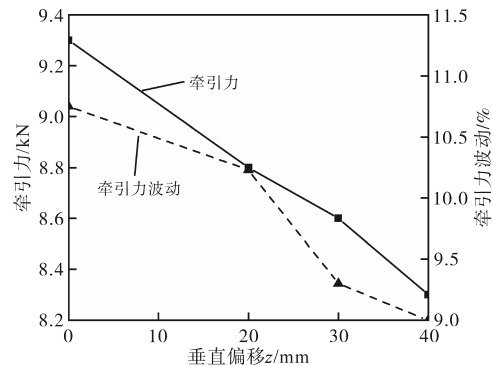


图9 不同垂直偏移对应牵引力及其波动

Fig.9 Propulsion and fluctuation values with different vertical offsets

#### 3.2 超导励磁横向偏移工况分析

当EDS列车在运行过程中遇到不平顺轨道、较大横风或车辆晃动时,车体不再位于轨道中心,发生横向偏移。根据图6b所示的模型,定义

横向偏移距离为变量,靠近牵引线圈的方向为正。计算了横向偏移距离为 $-20\sim 20$  mm时电机的磁感应强度和牵引力及其波动。

图10显示了超导磁体横向偏移为 $-20\sim 20$  mm时的气隙磁感应强度,幅值变化趋势一致。在正常情况下,磁感应强度为710 mT左右。在横向偏移范围内,磁感应强度最大为770 mT左右。这是由于超导磁体发生横向偏移,横向气隙长度减少20 mm,从而减小磁路,增强磁感应强度。

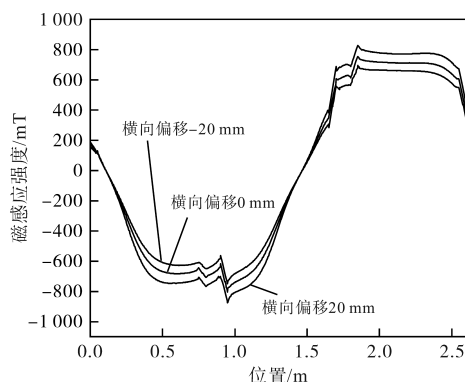


图10 不同横向偏移对应磁感应强度

Fig.10 Magnetic flux density with different lateral offsets

图11显示了电机在正常条件下以及超导磁体横向偏移 $-20\sim 20$  mm时的牵引力波形,随着超导磁体横向偏移距离的增加,牵引力的平均值增加。图12显示了电机牵引力及其波动与横向偏移之间的关系,当横向偏移为 $-20$  mm时,电机牵引力的平均值为8.5 kN,波动为8.24%。而当横向偏移为20 mm时,电机牵引力的平均值增加到10 kN,是偏移 $-20$  mm的1.2倍。同时,波动增加到13%,是偏移 $-20$  mm的1.6倍。因此超导磁体的横向偏移不仅增加了电机牵引力的平均值,还增加了波动值。

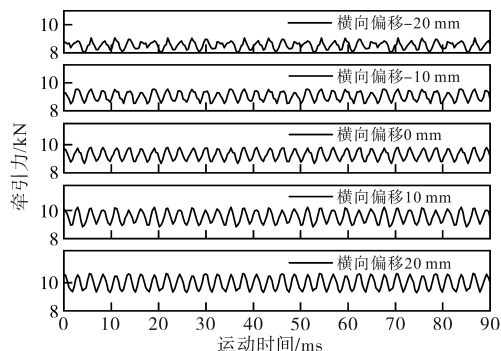


图11 不同横向偏移对应牵引力

Fig.11 Propulsion with different lateral offsets

### 3.3 超导励磁俯仰工况分析

列车运行过程中,经过布置有偏差或错位的地面线圈,会导致车体发生俯仰。将超导磁体的

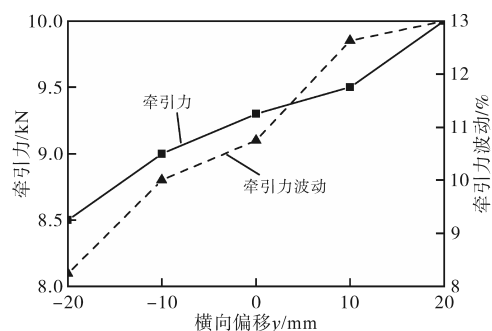


图12 不同横向偏移对应牵引力及其波动

Fig.12 Propulsion and fluctuation values with different lateral offsets

中心设置为俯仰中心,建立了如图6c所示的模型。俯仰偏移角度为 $2^\circ\sim 8^\circ$ ,计算该俯仰角度下电机的磁感应强度和牵引力及其波动。图13为不同俯仰角度对应的磁感应强度,随着俯仰角度增加,磁感应强度波形趋势相同,但幅值减小。

图14和图15为超导磁体俯仰偏移为 $2^\circ\sim 8^\circ$ 时电机的牵引力和波动波形。当俯仰偏移为 $2^\circ$ 时,牵引力的平均值为9.2 kN,波动为10.87%。当俯仰偏移为 $8^\circ$ 时,牵引力的平均值为7.9 kN,波动为134.18%,波动值增加了11.3倍。因此,随着超导磁体俯仰角度的增加,电机牵引力的平均值减小,而且牵引力的波动增加,对系统的运行稳定性产生严重的影响。

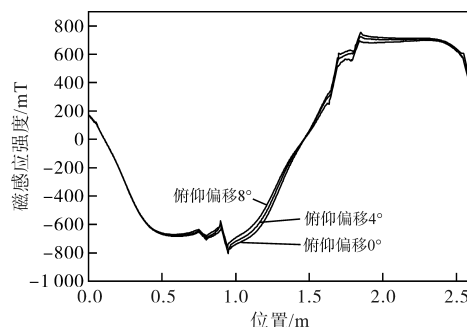


图13 不同俯仰偏移对应磁感应强度

Fig.13 Magnetic flux density with different pitch offsets

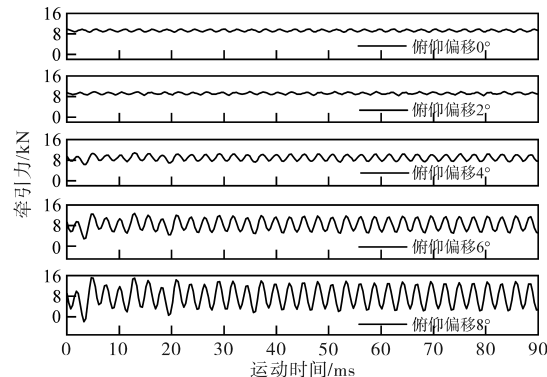


图14 不同俯仰偏移对应牵引力

Fig.14 Propulsion with different pitch offsets

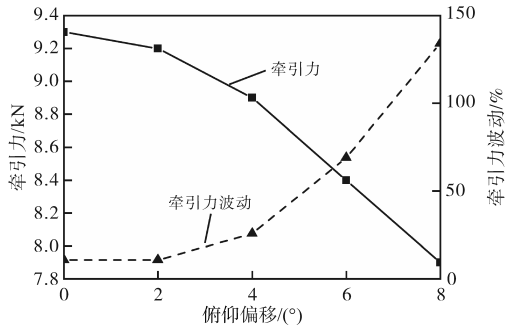


图15 不同俯仰偏移对应牵引力及其波动

Fig.15 Propulsion and fluctuation values with different pitch offsets

### 3.4 超导励磁侧滚工况分析

超导电动磁浮列车在通过曲线时,产生的离心力会使得列车发生侧滚。将超导磁体的中心定义为侧滚中心,建立如图6d所示模型。侧滚角度为 $2^{\circ}\sim 8^{\circ}$ ,计算该侧滚角度下电机的磁感应强度和牵引力及其波动。图16为不同侧滚角度下的磁感应强度,波形变化趋势一致,幅值随着侧滚角度的增加而增加。

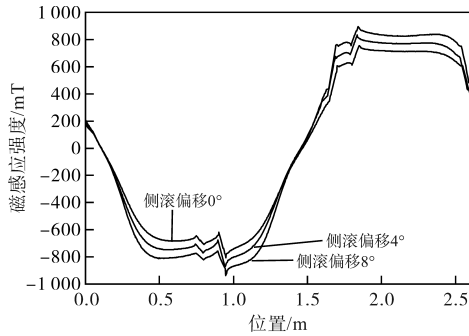


图16 不同侧滚偏移对应磁感应强度

Fig.16 Magnetic flux density with different roll offsets

图17和图18为超导磁体侧滚角度为 $2^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 时电机的牵引力及其波动波形。当侧滚角度为 $2^{\circ}$ 时,牵引力的平均值为9.6 kN,波动为13.54%。当侧滚角度为 $8^{\circ}$ 时,牵引力的平均值为10.3 kN,波动为48.54%,波动值增加了2.6倍。随着超导磁

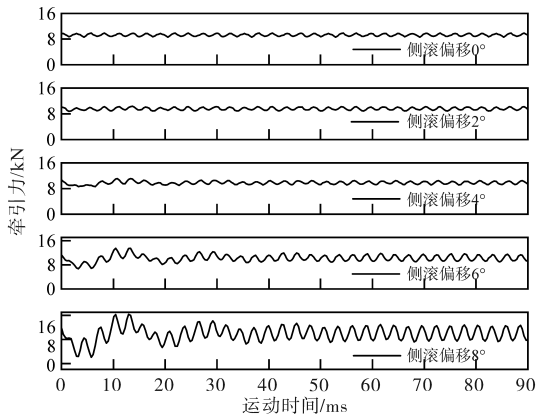


图17 不同侧滚偏移对应牵引力

Fig.17 Propulsion with different side roll offsets

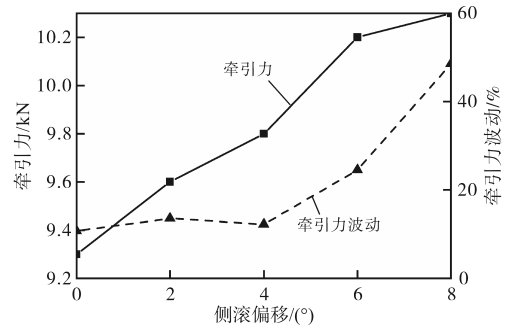


图18 不同侧滚偏移对应牵引力及其波动

Fig.18 Propulsion and fluctuation values with different roll offsets

体侧滚角度增加时,电机牵引力及其波动增加。

### 3.5 超导励磁偏航工况分析

超导磁浮列车在换步或气动升力干扰时车体发生倾斜,形成偏航导致超导磁体与牵引线圈之间的横向气隙变得不均匀。此时,超导磁体和牵引线圈之间没有接触,列车仍然可以运行,但是由于电机气隙不均匀性,而牵引线圈中的电流保持恒定,电机的磁感应强度就会不均匀,从而导致牵引力的变化,并随着列车的偏航程度不同,对牵引力的影响也不同。

将超导磁体的中心设置为偏航中心,产生逆时针偏航偏移角,牵引线圈和超导磁体之间的气隙长度从左到右逐渐减少。建立了一对超导磁体对应的电机模型,如图6e所示。偏航偏移角分别为 $0^{\circ}\sim 2^{\circ}$ ,可以计算出这些偏航角下电机的磁感应强度和牵引力及其波动。图19为气隙磁感应强度变化规律,当超导磁体产生不同的偏航偏移角时,波形呈现一致的趋势,幅值随偏航角的增大而增大。

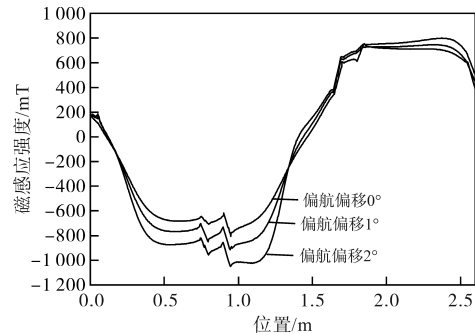


图19 不同偏航偏移对应磁感应强度

Fig.19 Magnetic flux density with different yaw offsets

图20和图21显示了超导磁体在偏航偏移 $0^{\circ}\sim 2^{\circ}$ 时的牵引力及其波动波形。在偏航偏移为 $0.5^{\circ}$ 时,平均牵引力为10.9 kN,波动为11.9%。偏航偏移为 $2^{\circ}$ 时,平均牵引力为12.6 kN,波动为23.8%,波动增加了1倍。因此,当超导磁体发生

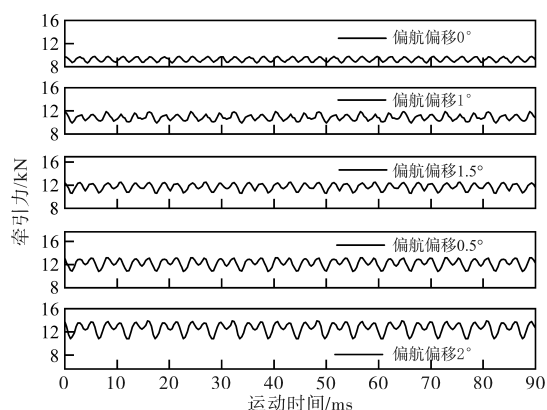


图20 不同偏航偏移对应牵引力

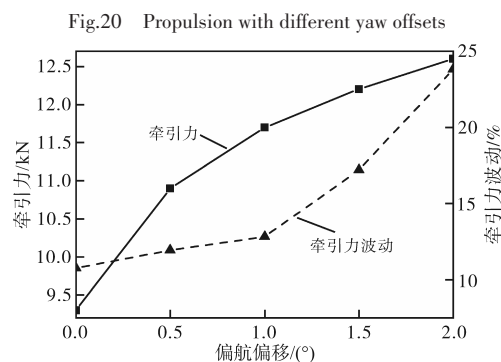


图21 不同偏航偏移对应牵引力及其波动

Fig.21 Propulsion and fluctuation values with different yaw offsets

偏航时,牵引力及其波动都增大。

## 4 结论

本文研究了单层牵引线圈排布的超导电动磁浮列车牵引系统性能,并基于空间谐波法建立了电机模型,利用有限元模型对其进行了验证,通过计算磁感应强度与牵引力进行比较,两种方法计算结果相近,有效地验证了空间谐波法的可靠性,对简化计算过程和提高计算效率具有重要意义。

由于超导磁体与电枢绕组均采用无铁心空心线圈设计,其磁场强度与电流呈线性关系,因此气隙波动不会导致磁路非线性饱和问题,研究了超导磁体随列车发生垂直、横向、俯仰、侧滚以及偏航时,长定子直线同步电机的电磁特性。姿态变化会导致电机气隙不均匀,进而影响磁感应强度、牵引力平均值和波动。垂直偏移和俯仰偏移会导致平均牵引力减小。然而,牵引力的波动随垂直偏移而减小,随俯仰偏移而增大。横向、俯仰和偏航偏移都会导致牵引力的平均值和波动增大,其中俯仰偏移对波动增大的影响非常明显。本文可为超导电动磁浮列车牵引系统的稳

定运行与控制提供理论依据。

## 参考文献

- [1] BOLDEA I, TUTELEA LN, XU W, et al. Linear electric machines, drives, and MAGLEVs: an overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(9): 7504–7515.
- [2] 刘士宽,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] 吕刚. 直线电机在轨道交通中的应用与关键技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5665–5674.  
LÜ Gang. Review of the application and key technology in the linear motor for the rail transit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5665–5674.
- [4] 邓桂美,张越,贺永鹏,等. 高速磁浮车载电网组网测试系统[J]. 电气传动, 2025, 55(2): 82–86, 96.  
DENG Guimei, ZHANG Yue, HE Yongpeng, et al. High-speed maglev onboard power net networking test system[J]. Electric Drive, 2025, 55(2): 82–86, 96.
- [5] TAKENORI Yonezu, KEN Watanabe, ERIMITSU Suzuki, et al. Study on electromagnetic force characteristics acting on levitation/guidance coils of a superconducting maglev vehicle system[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 1–5.
- [6] 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.
- [7] 胡道宇,冯馨月,张志华. 超导电动悬浮系统阻尼特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4679–4688.  
HU Daoyu, FENG Xinyue, ZHANG Zhihua. Study on the damping characteristics of superconducting electrodynamic suspension system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4679–4688.
- [8] OHASHI S, UEDA N. Dependence of the quenched SC coil position on the transient motion of the superconducting magnetically levitated bogie[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4): 1–4.
- [9] LIM J, LEE C Y, YE J O, et al. Performance evaluation of superconducting electrodynamic suspension for hyperloop using static experiments[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2024, 34(5): 1–6.
- [10] ZHAO Z, MA G, LIU K, et al. 3-D analysis of electromagnetic forces of a real-scale superconducting linear synchronous motor for EDS train[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2024, 34(5): 1–6.

(下转第38页)

- 2585-2592.
- [19] 姚艳,高飞翎,周子旺.基于改进蝙蝠算法的含分布式电源配电网无功优化[J].电气传动,2023,53(6):46-52.
- YAO Yan, GAO Feiling, ZHOU Ziwan, et al. Reactive power optimization of distribution networks with distributed generations based on improved bat algorithm[J]. Electric Drive, 2023, 53(6):46-52.
- [20] 赵晶晶,朱炯达,刘帅,等.基于集群划分的配电网多时间尺度分布式有功-无功协同优化方法[J].电测与仪表,2024,61(10):57-66.
- ZHAO Jingjing, ZHU Jiongda, LIU Shuai, et al. Multi-timescale distributed active and reactive power coordinated optimization method of distributed network based on cluster division[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10):57-66.
- [21] 张浩禹,邱晓燕,周晨锐,等.考虑燃气轮机无功支撑的IEGES有功-无功协调优化模型[J].电气传动,2021,51(12):52-58.
- ZHANG Haoyu, QIU Xiaoyan, ZHOU Shengrui, et al. Coordinated active-reactive optimization model for IEGES considering reactive power support by gas-fired turbine[J]. Electric Drive, 2021, 51(12):52-58.
- [22] 李崎勇,郑一飞,刘斌,等.基于主从博弈的含碳捕集与热电联产综合能源系统优化运行[J].电测与仪表,2024,61(6):10-19.
- LI Jiyong, ZHENG Yifei, LIU Bin, et al. Optimal operation of an integrated energy system with carbon capture system and combined heating and power based on a master-slave game[J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2024, 61(6):10-19.
- [23] 陈厚合,高康静,张儒峰,等.考虑异步通信的配电-气网分布式有功-无功协同优化[J].电力系统自动化,2024,48(20):69-80.
- CHEN Houhe, GAO Kangjing, ZHANG Rufeng, et al. Distributed active-reactive power coordinated optimization for electricity-gas distribution network considering asynchronous communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(20):69-80.
- [24] 黎静华,王治邦,姜娟.计及供能可靠性的电-气互联传输网络优化规划[J].电力自动化设备,2021,41(9):164-172.
- LI Jinghua, WANG Zhibang, JIANG Juan. Optimal planning of integrated electricity-gas transmission network considering energy supply reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):164-172.
- [25] 张林垚,郑洁云,孔顺飞,等.考虑综合能源系统的配网规划模型及其求解方法[J].南方电网技术,2019,13(6):76-86.
- ZHANG Linyao, ZHENG Jieyun, KONG Shunfei, et al. Planning model of distribution network considering the integrated energy system and its solution method[J]. Southern Power Grid Technology, 2019, 13(6):76-86.

收稿日期:2024-12-19

修改稿日期:2025-02-28

(上接第9页)

- tivity, 2021, 31(5):1-5.
- [11] ZHAO Z, MA G, LUO J, et al. Modeling and characteristic analysis of air-cored linear synchronous motors with racetrack coils for electrodynamic suspension train[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 8(2):1828-1838.
- [12] 李婧,徐佳明,刘康,等.高温超导直线同步电机电磁力仿真与实验研究[J].中国电机工程学报,2024,44(11):4513-4524.
- LI Jing, XU Jiaming, LIU Kang, et al. Simulation and experimental study on electromagnetic forces characteristic of high temperature superconducting linear motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11):4513-4524.
- [13] FU X, HUANG J, WANG D, et al. Electromagnetic characteristics analysis and thrust fluctuation optimization in integrated propulsion, levitation, and guidance systems[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2024, 34(6):1-10.
- [14] 徐杰.超导磁悬浮列车用直线发电机的设计与特性解析分析[D].北京:北京交通大学,2020.
- XU Jie. Design and characteristic analysis of linear generator for superconducting maglev train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

收稿日期:2025-03-25

修改稿日期:2025-05-23