DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.136

轨道不平顺激励对高温超导磁浮列车电机悬挂的影响

郑　杰[1]，何沛恒[2]，李　强[1]，邓　斌[1]，邓自刚[2]
（1.西南交通大学 先进驱动节能技术教育部工程研究中心，四川 成都 610031；
2.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031）

摘　要：高温超导磁浮列车在运行过程中受到轨道随机不平顺激励的影响，车体和磁浮架的振动会传递至直线电机动子而导致气隙变化，变化后的电磁力反作用于电机悬挂系统，进而影响磁浮架和车体振动。二者的耦合振动一定程度上会影响高温超导磁浮列车的安全运行。为了减少轨道随机不平顺激励对电机悬挂系统的影响，文章建立了多刚体动力学理论模型，并在周期性激励的作用下，对理论模型进行了动力学响应的仿真验证，证明了动力学理论模型的正确性。进一步地，在UM软件中以电机法向力和轨道随机不平顺作为外部激励，对高温超导磁浮列车动力学模型进行仿真，研究了电机悬挂系统的垂向刚度对直线电机气隙、车体和悬浮架振动、列车运行平稳性等参数的影响并对该刚度值进行了合理优化。结果表明：增大直线电机悬挂系统的垂向刚度能一定程度提高车体平稳性；同时增大垂向刚度能一定程度上减小气隙的变化和电机的振动，从而降低和悬浮架的耦合作用。研究结果是在特定的结构参数、负载条件下的仿真分析结果，可为高温超导磁浮列车动力学分析提供一定参考作用。

关键词：轨道随机不平顺；法向力；高温超导磁浮列车；直线电机悬挂；UM

中图分类号：U237　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-128X（2024）01-0101-08

0　引言

近年来，高温超导制式磁悬浮技术是磁浮列车发展的研究热点之一[1]，高温超导磁浮列车的牵引依靠直线电机动子和地面定子绕组之间的电磁力实现[2]。直线电机运行时，电机动子和定子绕组存在纵向牵引力、法向力和横向纠偏力。其中受气隙变化影响较大的是法向力，且气隙与法向力呈负刚度关系。高温超导磁浮列车在运行过程中，受到轨道随机不平顺激励的影响，导致磁浮架和车体的振动，其激励又会传递至直线电机动子而导致电磁场变化；变化的法向力作用在悬挂系统易引起悬挂系统的振动，反过来又导致电机动子振动，恶化磁浮架的运行性能[3]。

目前，已有诸多针对高温超导磁浮列车动力学进行的研究，如文献[4]建立了车辆-轨道耦合动力学模型，通过仿真对磁浮车辆运行平稳性进行评价，并考虑运行平稳性对磁浮车的悬挂参数及轨道参数提出了建议。文献[5]和文献[6]建立了高温超导磁浮列车动力学模型，分别在列车运行的直线段和曲线段进行动力学仿真，并提出了相关优化建议。但是上述研究均未考虑直线电机垂向电磁力对动力学模型的影响，而随气隙变化的电磁力作用在磁浮架上会导致磁浮架的振动，从而影响结果。对于法向力，文献[7]和文献[8]在分析时将法向力等效为弹簧力，即在平衡气隙值附近将法向力线性化。文献[9]根据日本地铁协会提供的资料，采用二次曲线拟合建立了法向力与磁极气隙变化的非线性关系，这些学者将直线电机看作刚性连接在

基金项目：西南交通大学学科交叉研究专项(2682021ZTPY109)
通信作者：邓　斌（1964—），男，博士，教授，博士生导师，主要从事机电液一体化方面的研究；E-mail: bind@home.swjtu.edu
引用格式：郑杰, 何沛恒, 李强, 等. 轨道不平顺激励对高温超导磁浮列车电机悬挂的影响[J]. 机车电传动, 2024(1): 101-108.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.136.
Citation：ZHENG Jie, HE Peiheng, LI Qiang, et al. Impact of track irregularities on the motor suspension of high-temperature superconducting maglev trains[J]. Electric drive for locomotives,2024(1): 101-108.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.136.

构架或转轴上，并未考虑电机振动对悬挂系统的影响。

针对上述研究的不足，本文研究旨在通过轨道随机不平顺激励下，对高温超导磁悬浮直线电机动子悬挂系统的振动分析，探究直线电机动子振动的机理，通过UM软件分析不同电机悬挂参数对直线电机气隙的影响，从而减少悬浮架和车体向直线电机动子振动的传递，减少电机动子本身的振动，提高磁浮列车的运行稳定性。

1 动力学模型建立及验证

1.1 总体结构

本文方案采用单车六悬浮架。据多体动力学理论，将车体、悬浮架和直线电机动子视作多刚体系统，通过空气弹簧和悬挂装置将车体、悬浮架、电机动子连接起来。其中，车体和悬浮架通过二系垂向阻尼器和空气弹簧连接，直线电机和悬浮架之间依靠阻尼器和垂向吊杆连接。本文重点研究轨道随机不平顺对单车垂向动力学的影响，横向振动较小，依靠垂向吊杆及安装座的横向刚度提供横向定位。同时，斜置的电机阻尼器可同时降低横向和垂向的振动，减少结构的冗余。每个悬浮架左右两边分别悬挂6个杜瓦瓶。列车整体结构以及单个磁浮架的三维模型分别如图 1、图 2 所示。

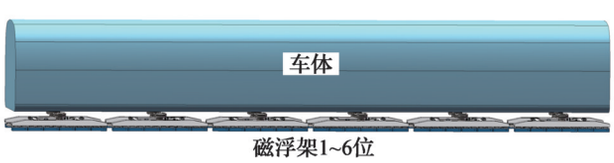


图 1 高温超导磁浮列车结构示意图

Fig. 1 Structural of high-temperature superconducting maglev train

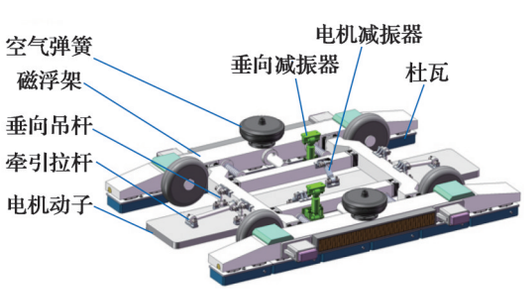


图 2 单个磁浮架SolidWorks模型

Fig. 2 A single maglev frame SolidWorks model

1.2 直线电机电磁力模型

直线电机法向力不是均布载荷，而是随作用位置的气隙变化而变化。正常气隙在0.012 m左右。参考文献[8]提供的气隙与法向力的关系数据，在本文模型中，将法向力考虑成随气隙变化的力元， 5 个集中力沿轨道方向作用于电机动子上，受力分析如图 3 所示，其中F表示法向力，x表示气隙量。

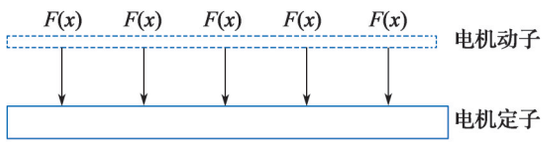


图 3 直线电机动力学模型

Fig. 3 Linear motor dynamics model

电磁力与气隙的关系为

$$F(x)=9600-300000x \tag{1}$$

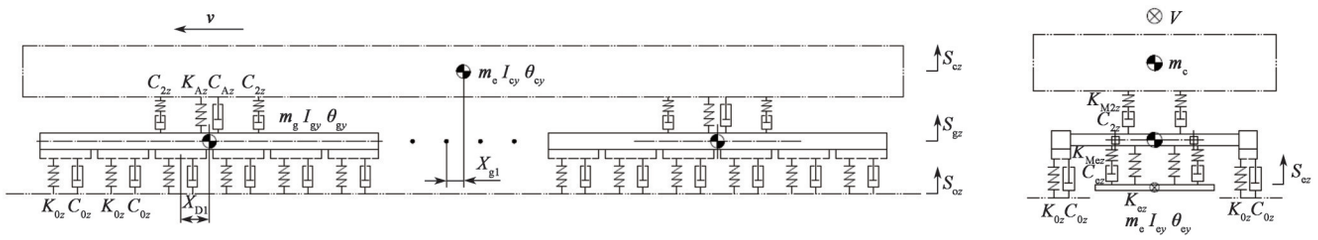
1.3 垂向动力学模型

根据1.1节中的三维模型，在建立磁浮列车的整体动力学模型时，其悬浮力等效为弹簧阻尼模型[10]，而杜瓦瓶产生的悬浮力实际上为一个分布力，本文将其简化成离散的集中力。文中模型一节车上有6个悬浮架，每个悬浮架上有 12 个杜瓦瓶，在每个杜瓦瓶上设置1个悬浮力。这一点满足文献[11]提出的对于模拟连续分布悬浮力的集中力个数的要求。刚度较大的垂向吊杆在垂向运动上对直线电机有较大的限制作用，因此将垂向吊杆等效为刚性较大的线性力元。直线电机的垂向阻尼器对直线电机垂向高频振动有很好的抑制作用，因此将垂向阻尼器等效为Maxwell模型。同理，将连接车体和磁浮架的二系悬挂阻尼器也等效为Maxwell模型。根据文献[12]的研究，空气弹簧可等效为弹簧阻尼模型。直线电机法向吸力由1.2节中建立的数学模型表征，在本文中，额定气隙设置为12 mm，初始法向吸力为30 kN。本文主要针对随机不平顺激励下对直线电机悬挂系统垂向动力学的影响进行研究分析，对列车纵向牵引影响很小，二者可视为相互解耦。由于每一位磁浮架模型的相似性，本文以2、5位磁浮架为例，建立单节车体的垂向耦合拓扑图，如图 4 所示。图 4 中的S_{cz}、S_{gz}、S_{ez}及S_{0z}分别为车体、悬浮架、电机和杜瓦瓶的垂向位移，θ_{cy}、θ_{gy}和θ_{ey}分别表示车体、悬浮架和电机的点头角度。

在图 4 所示的单节高温超导磁悬浮列车机电耦合动力学模型中，单节车在静平衡时仅考虑浮沉和点头运动，共有 26 个自由度。系统动力学方程中的数学符号的物理意义见表 1。

基于牛顿第二定律，可得车辆系统动力学方程。在xOz平面中，列车运行方向为x轴负方向，假设构件虚位移与z轴正向相同为正，沿y轴逆时针旋转为正，建立高温超导磁悬浮列车机电耦合垂向耦合动力学模型。

2、5位磁浮架的浮沉动力学模型为：



(a) 列车*xOz*面垂向耦合拓扑图　　(b) 列车*yOz*面垂向耦合拓扑图

图 4　高温超导磁悬浮列车机电耦合垂向动力学模型

Fig. 4　Electromechanical coupled vertical dynamics model of high-temperature superconducting maglev trains

表 1　模型和方程中数学符号的物理意义

Table 1　Physical significance of mathematical symbols in the model and equations

符号	物理意义	符号	物理意义
m	m_g:磁浮架质量	F	F_{Az5}:5 位磁浮架空气弹簧对车体的悬挂力
	m_c:车体质量		F_{2z5}:5 位磁浮架垂向阻尼器对车体的悬挂力
	m_E:电机动子质量		F_{0z5}:5 位磁浮架两侧杜瓦对磁浮架的悬浮力
I	I_{gy}:刚性磁浮架转动惯量_y		F_{0z2}:2 位磁浮架两侧杜瓦对磁浮架的悬浮力
	I_{cy}:车体转动惯量_y		F_{Az2}:2 位磁浮架空气弹簧对车体的悬挂力
	I_{ey}:电机转动惯量_y		F_{2z2}:2 位磁浮架垂向阻尼器对车体的悬挂力
X	X_{g1}:相邻磁浮架中心距（一半）		F_{3z2}:2 位直线电机吊杆对磁浮架的力
	X_{2z}:二系垂向阻尼x向定位		F_{4z2}:2 位直线电机阻尼器对磁浮架的力
	X_{3z}:电机动子垂向悬挂定位		F_{3z5}:5 位直线电机吊杆对磁浮架的力
	X_{4z}:电机动子垂向阻尼器定位		F_{4z2}:5 位直线电机阻尼器对磁浮架的力
	X_{D1}:相邻杜瓦瓶中心距（一半）	C	C_{0z}:悬浮模块垂向等效阻尼
K	K_{0z}:悬浮模块垂向等效刚度		C_{2z}:二系垂向减振器阻尼
	K_{M2z}:二系垂向减振器刚度		C_{ez}:电机动子垂向等效阻尼
	K_{ez}:电机动子垂向等效刚度	t	运行时间
	K_{Mez}:电机动子垂向减振器刚度	M_e	直线电机点头力矩
	K_{Az}:空气弹簧垂向等效刚度	$F(x)$	直线电机等效法向吸力

$$\left.\begin{aligned} m_g\cdot\ddot{S}_{gz2}&=2\sum_{i=1}^{6}F_{0z2i}-2F_{Az2}-F_{2z2F}-F_{2z2B}+\\ &\quad F_{3z2F}+F_{3z2B}+F_{4z2F}+F_{4z2B}\\ m_g\cdot\ddot{S}_{gz5}&=2\sum_{i=1}^{6}F_{0z5i}-2F_{Az5}-F_{2z5F}-F_{2z5B}+\\ &\quad F_{3z5F}+F_{3z5B}+F_{4z5F}+F_{4z5B}\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

2、5 位磁浮架的点头动力学模型分别为：

$$\left.\begin{aligned} I_{gy}\cdot\ddot{\theta}_{gy2}&=10(F_{0z26}-F_{0z21})X_{D1}+6(F_{0z25}-F_{0z22})X_{D1}+\\ &\quad 2(F_{0z24}-F_{0z23})X_{D1}+(F_{2z2F}-F_{2z2B})X_{2z}+\\ &\quad (F_{3z2B}-F_{3z2F})X_{3z}+(F_{4z2B}-F_{4z2F})X_{4z}\\ I_{gy}\cdot\ddot{\theta}_{gy5}&=10(F_{0z56}-F_{0z51})X_{D1}+6(F_{0z55}-F_{0z52})X_{D1}+\\ &\quad 2(F_{0z54}-F_{0z53})X_{D1}+(F_{2z5F}-F_{2z5B})X_{2z}+\\ &\quad (F_{3z5B}-F_{3z5F})X_{3z}+(F_{4z5B}-F_{4z5F})X_{4z}\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

车体的浮沉动力学模型为

$$m_c\cdot\ddot{S}_{cz}=\sum_{i=2,5}(2F_{Azi}+F_{2ziF}+F_{2ziB})\tag{4}$$

车体的点头动力学模型为

$$\begin{aligned} I_{cy}\cdot\ddot{\theta}_{cy}&=6(F_{Az5}-F_{Az2})X_{g1}-\\ &\quad F_{2z2F}(3X_{g1}+X_{2z})-F_{2z2B}(3X_{g1}-X_{2z})+\\ &\quad F_{2z5F}(3X_{g1}-X_{2z})+F_{2z5B}(3X_{g1}+X_{2z})\end{aligned}\tag{5}$$

2、5 位电机的垂向浮沉动力学模型分别为：

$$\left.\begin{aligned} m_e\cdot\ddot{S}_{ez2}&=-F_{3z2F}-F_{3z2B}-F_{4z2F}-F_{4z2B}+\sum_{i=1}^{5}F_i(x)\\ m_e\cdot\ddot{S}_{ez5}&=-F_{3z5F}-F_{3z5B}-F_{4z5F}-F_{4z5B}+\sum_{i=1}^{5}F_i(x)\end{aligned}\right\}\tag{6}$$

2、5 位电机的点头动力学模型分别为：

$$\left.\begin{aligned} I_{ey}\cdot\ddot{\theta}_{ey2}&=(F_{3z2F}-F_{3z2B})X_{3z}+(F_{4z2F}-F_{4z2B})X_{4z}+M_e\\ I_{ey}\cdot\ddot{\theta}_{ey5}&=(F_{3z5F}-F_{3z5B})X_{3z}+(F_{4z5F}-F_{4z5B})X_{4z}+M_e\end{aligned}\right\}\tag{7}$$

1.4　理论模型验证

为了验证上述理论模型的正确性，在 MATLAB 中进行理论计算后使用 UM 软件进行仿真验证，并对求解的结果进行对比。

设置轨道激励为周期性激励：

$$\begin{aligned} R(x)&=A_1\sin(\omega_1 x)+A_2\sin(\omega_2 x)=\\ &\quad 0.0015\sin(0.13\pi x)+0.0005\sin(0.07\pi x)\end{aligned}\tag{8}$$

设运行速度v为 50 m/s（180 km/h），运行时间t为 40 s，即运行了 2 000 m，$x\in[0, 2\,000]$，生成的轨道激励如图 5 所示。

根据前文分析建立动力学模型，在 UM 软件中建立仿真模型，如图 6 所示。

由此，将通过 MATLAB 软件中 ODE45 程序计算的理论模型结果与 UM 数值仿真结果进行对比，以 2 位磁浮架和车体绕y轴点头、沿z轴位移为例。图 7 为磁浮

架的理论计算与仿真结果对比，图 8 为车体的理论计算与仿真结果对比。

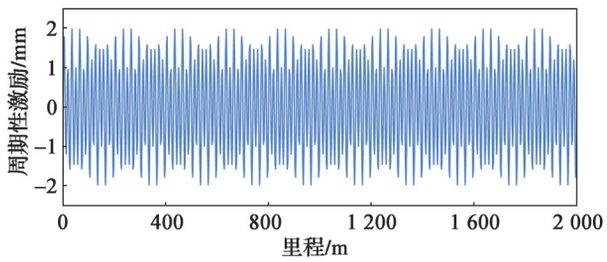
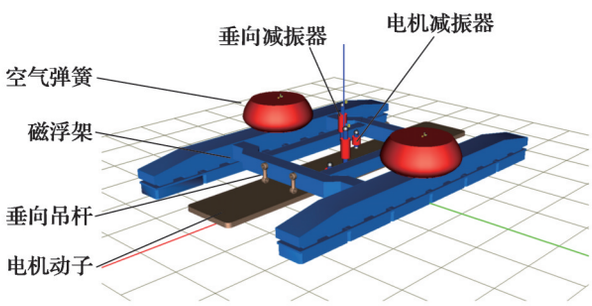
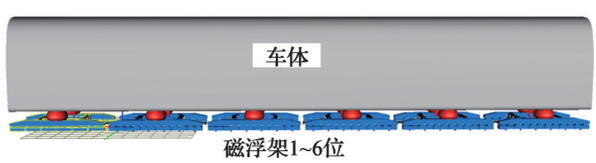


图 5　周期性激励

Fig. 5　Periodic excitation



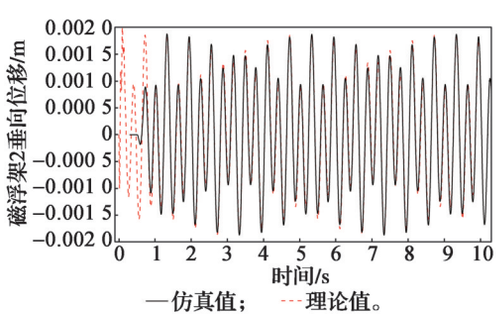
(a) 磁浮架动力学模型



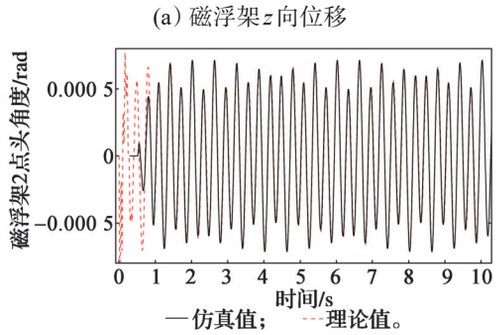
(b) 整车动力学模型

图 6　UM 动力学模型

Fig. 6　UM dynamics model



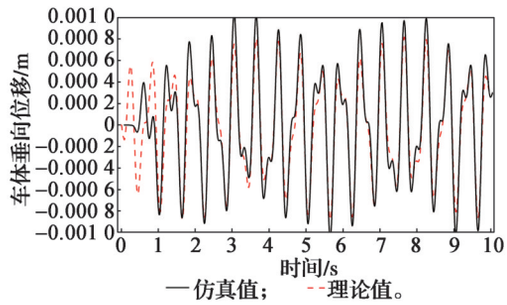
(a) 磁浮架 z 向位移



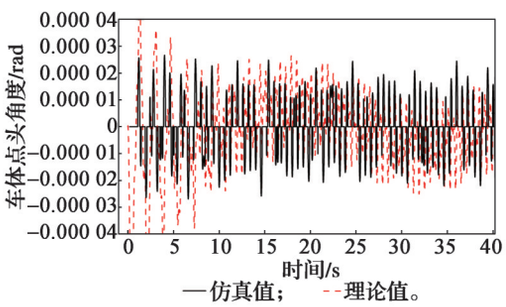
(b) 磁浮架绕 y 轴点头

图 7　仿真对比磁浮架位移与点头角度

Fig. 7　Simulation comparison of maglev frame displacement and pitch



(a) 车体 z 向位移



(b) 车体绕 y 轴点头角度

图 8　仿真对比车体位移与点头角度

Fig. 8　Simulation comparison of carbody displacement and pitch

由图 7 和图 8 可知，在初始阶段二者存在一定差距，这是由于 UM 软件在仿真时，会让模型运行一小段时间，并不输出数据。在稳定段两者磁浮架的数据基本一致；但车体的数据存在一定差距，原因在于实际运行中受轨道激励影响，磁浮架点头产生了纵向位移分量，与车体之间存在纵向挫动，使得二者速度并非严格意义的恒定值，但波动较小，可通过增加牵引拉杆进行解决。可以看出，二者结果吻合度较好，在设计分析中是等效的。

2　外部激励

磁浮轨道几何不平顺是高温超导磁浮列车的激励源之一，它是导致车体、悬浮架以及电机悬挂系统产生振动的主要因素。高温超导磁悬浮列车轨道随机不平顺主要来源于永磁体安装位置误差和地基沉降[13]，与轮轨列车轨道不平顺有较大差异。

由于高温超导磁浮还未进入商业化运营阶段，尚未有可用的功率谱函数，本文采用日本低温超导电动悬浮的磁轨不平顺功率谱形式[14]。该功率谱密度函数频率响应函数为

$$S(f)=0.02v^{0.8}f^{-1.8} \tag{9}$$

式(9)中，磁浮列车的运行速度 v=50 m/s，轨道不平顺的波长选择 3.216~398.107 m，模拟步长 0.000 1 s。根据频率和波长 $f=1/\lambda$ 的关系，可以确定轨道不平顺对应的频率，结合功率谱密度函数，可以计算出频率上的谱密度。根据估计功率谱密度的周期图法可知，功

率谱密度值在离散的采样点上与信号的频谱有着一个确定的关系。在功率谱密度函数上离散采样构造出频谱$X(k)$，然后再对其进行傅立叶逆变换，即可得到时域的模拟轨道不平顺激扰函数[15]$x(n)$，公式如下：

$$x(n)=\frac{1}{N_r}\sum_{k=0}^{N_r-1}X(k)\mathrm{e}^{\frac{i2\pi kn}{N_r}},\quad n=0,1,\cdots,N_r-1 \tag{10}$$

图 9 是基于傅里叶逆变换模拟得到的时域下的轨道不平顺激励。

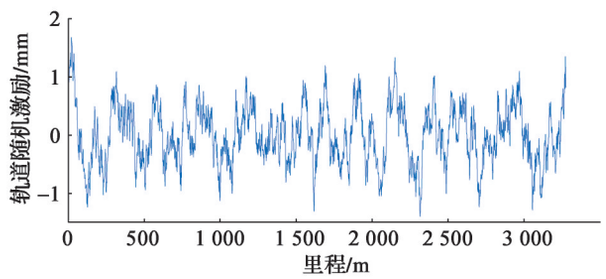


图 9　高温超导磁悬浮轨道随机不平顺时域响应

Fig. 9　Time-domain response of random track irregularities in high-temperature superconducting maglev system

随机不平顺时域序列转化为功率谱密度与方程得到功率谱函数对比如图 10 所示。从图 10 可以看到，模拟值和分析值基本吻合，说明模拟的轨道随机不平顺时域可信。将采用上述方法得到的轨道不平顺时域值作为磁浮架的动态激励源，将磁浮架底部各个杜瓦的中心点视为轨道不平顺激励的作用点。

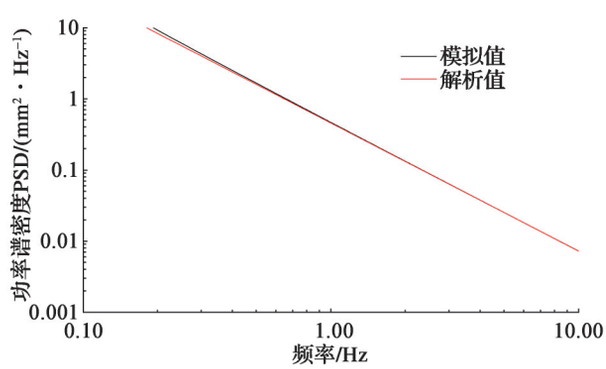


图 10　垂向不平顺功率谱估计与功率谱函数结果对比

Fig. 10　Comparison of vertical irregularity power spectral estimation and power spectral density results

3　悬挂系统垂向刚度的影响

电机动子的垂向悬挂刚度直接影响列车的运行。通过选择悬挂系统不同刚度倍数（0.1 倍、0.2 倍、0.4 倍、0.8 倍、1 倍、2 倍、5 倍、8 倍、10 倍）来分析其对气隙、车辆运行动力学指标以及车体、磁浮架和电机加速度的影响。本文垂向刚度以 50 MN/m 为基准。

3.1　垂向刚度对电机气隙的影响

电机气隙是直线电机的关键指标，若气隙过大，则电机的效率和功率因数会降低；而气隙过小可能导致电机与定子在列车运行中发生刮蹭，从而影响行车安全。

直线电机气隙随时间变化如图 11 所示。当直线电机悬挂装置的垂向刚度较低时，电机的气隙变化较大，气隙最大值可达 0.014 3 m。随着垂向刚度的增加，电机的气隙变化逐渐减小，且当刚度倍数为 10 倍时，电机气隙最大值为 0.013 4 m。图 12 显示了悬挂装置不同刚度倍数下，直线电机最大气隙变化情况。由图 12 可看到，当垂向刚度增加到一定程度后，继续增加垂向刚度对气隙最大波动值基本没有影响。

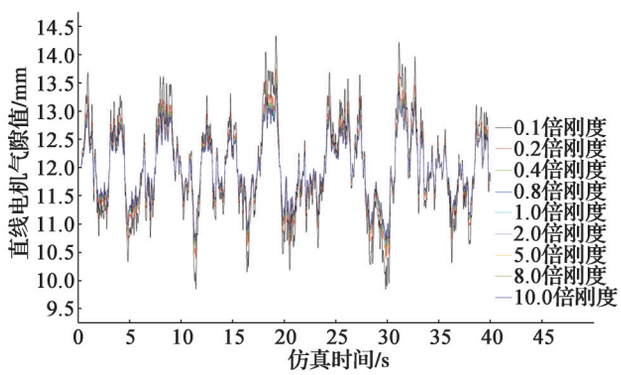


图 11　不同刚度下直线电机气隙随时间变化

Fig. 11　Variations in air gap of linear motor with time at different stiffness levels

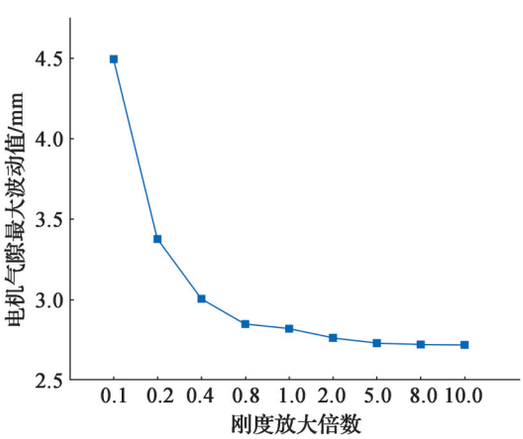


图 12　不同刚度下直线电机最大气隙变化

Fig. 12　Variations in maximum air gap of linear motor at different stiffness levels

3.2　垂向刚度对振动加速度的影响

本文采用加速度方均根值来评价不同垂向悬挂刚度下电机、磁浮架和车体的振动大小，其随垂向刚度变化情况如图 13 所示。从图 13 可以看出，直线电机、磁浮架、车体这三者有相似的振动趋势。适当增加电机悬挂装置的垂向刚度，可以显著降低三者垂向振动的加速度方均根值。然而，当垂向刚度增加到一定程度后，继续增加垂向刚度对加速度方均根值的影响较小。这是由于电机的法向吸力为负刚度，即气隙越小吸力越大，因此气隙波动越小，法向吸力波动就越小，

电机振动的振幅也越小。然而，较大的垂向刚度并不能明显改善电机的振动衰减效果，反而可能增加电机的振动加速度。因此，悬挂装置较低的垂向定位刚度会加剧电机的垂向振动现象，同时较低的垂向刚度也会将较大振动传递给车体和磁浮架，影响列车运行的平稳性以及乘客的舒适性。

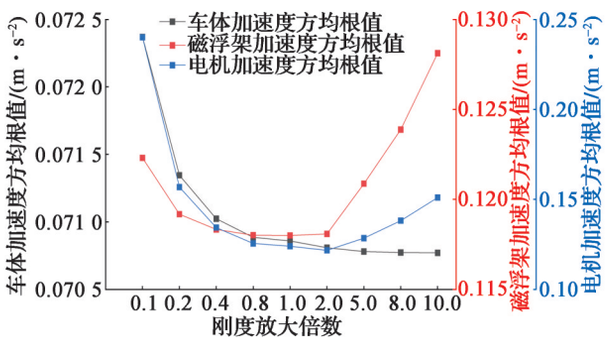


图 13　垂向刚度对动力学性能指标的影响

Fig. 13　Impact of vertical stiffness on dynamic performance indexes

3.3　垂向刚度对列车运行平稳性的影响

车辆的平稳性是指其 Sperling 平稳性和乘坐舒适性。由 3.2 节可知，直线电机悬挂系统的垂向刚度较小时，车体的加速度方均根值较大，当逐渐增加悬挂系统的垂向刚度时，车体的加速度方均根值显著减小，最后其随着垂向刚度的增加逐渐趋近稳定值。垂向刚度对列车运行平稳性的影响如图 14 所示：随着垂向刚度的增加，垂向平稳性的变化类似于乘坐舒适性，二者在减小到一定程度后变化较小。因此可以得出结论，垂向定位刚度较小时对平稳性指标影响较大，而较大的垂向定位刚度基本上不会对平稳性产生影响。

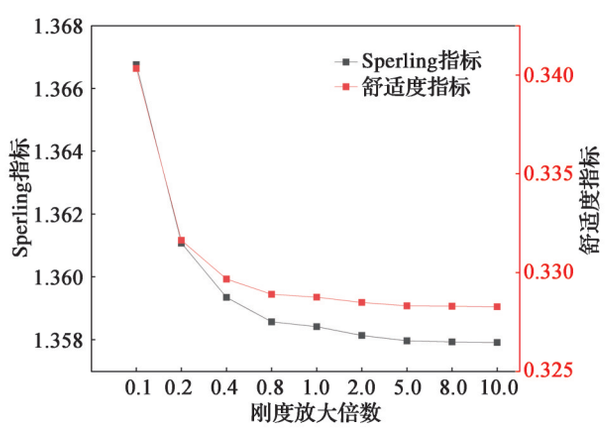


图 14　垂向刚度对列车运行平稳性的影响

Fig. 14　Impact of vertical stiffness on train ride comfort

3.4　垂向刚度优化

为了得到较为合理的刚度值，本文对不同刚度下的车体、磁浮架和电机动子的加速度方均根值进行多项式拟合，结果如图 15 所示。从图 15 可以看出，拟合后的曲线和原始数据契合度较高，可用拟合后的曲线代替原始数据进行优化。

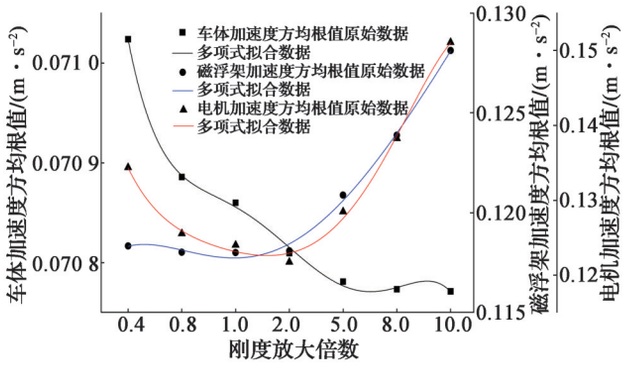


图 15　多项式拟合对比图

Fig. 15　Comparison of polynomial fitting graphs

在 MATLAB 中以 3 条曲线对应数值的和的最小值为优化目标，经计算可得：当刚度倍数为 2 倍时，3 条曲线对应值的和最小。因此，当悬挂装置取该刚度值时，车体、磁浮架和电机的加速度方均根值都在合理的范围内，保证了高温超导磁悬浮列车的平稳运行。

综上所述，悬挂装置的垂向刚度对气隙、振动加速度以及车体运行平稳性都有一定的影响，合理的刚度值可以较好地隔离磁浮架传递给电机动子的振动，保证了直线电机气隙值稳定在合适的范围内，从而降低因气隙变化导致法向力变化，减小磁浮架、电机和车体的振动耦合 。

4　结论

为研究高温超导磁悬浮单车直线电机悬挂系统垂向刚度对车辆动力学性能的影响，建立了高温超导磁浮列车多体动力学模型，以轨道随机不平顺激励为外部激励，基于 UM 多体动力学软件，分析了不同刚度下电机气隙，电机、磁浮架、车体的振动，以及列车运行的平稳性变化规律，得出以下结论：

①适当增大垂向刚度，可以在一定程度上减小气隙的变化量，并降低气隙的波动最大值，从而有效预防电机与定子的刮蹭现象，提高直线电机运行的效率。

②直线电机悬挂系统的垂向刚度对列车运行平稳性有一定影响。增大垂向刚度可以降低车体运行的平稳性数值。当垂向刚度增大到一定值后，进一步增加刚度对车辆的动力学评价指标影响逐渐变得不明显。

③适当增大垂向刚度可以减小电机振动的幅度和降低电机垂向振动加速度的方均根值。通过对车体、磁浮架和电机动子加速度振动优化，对于垂向吊杆推荐的垂向刚度在 100 MN/m 左右为宜。

④本文针对直线电机悬挂装置的垂向刚度优化研究，为直线电机气隙值保持恒定提供了参考方法，有效降低电机法向力对高温超导磁悬浮列车动力学的影

响，也保证了直线电机的牵引效率。本文建立的直线电机模型有待进一步优化，在今后的工作中可用解析法求解电机的法向力同时在 Ansys Maxwell 软件中进行验证，并与UM软件联合仿真，得到更为精确的高温超导磁悬浮列车机电耦合动力学响应。

参考文献：

[1] 邓自刚, 刘宗鑫, 李海涛, 等. 磁悬浮列车发展现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 455-474.
DENG Zigang, LIU Zongxin, LI Haitao, et al. Development status and prospect of maglev train[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2022, 57(3): 455-474.

[2] 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.
LYU 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.

[3] 王潇. 直线电机地铁三维空间耦合动力学仿真与线形参数研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
WANG Xiao. Three-dimensional space coupled dynamics simulation and linear parameter study of linear motor subways[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

[4] 李海涛. 磁轨不平顺激扰下高温超导钉扎高速磁浮车-轨耦合动力学研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
LI Haitao. Research on the coupled dynamics of high-temperature superconducting pinning high-speed maglev train and track under magnetic rail irregular excitations[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

[5] WANG Hongdi, DENG Zigang, MA Shunshun, et al. Dynamic simulation of the HTS maglev vehicle-bridge coupled system based on levitation force experiment[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2019, 29(5): 1-6.

[6] 陈志贤, 池茂儒, 吴兴文, 等. 高温超导磁悬浮车辆曲线通过动态特性分析[J]. 机车电传动, 2020(4): 70-75.
CHEN Zhixian, CHI Maoru, WU Xingwen, et al. Analysis of dynamic characteristics of high temperature superconducting maglev vehicle in curve passing[J]. Electric drive for locomotives, 2020(4): 70-75.

[7] 夏景辉. 直线电机轮轨交通气隙及轨道平顺性对系统动力响应影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
XIA Jinghui. Research on the impact of air gap and track smoothness in linear motor wheel-rail transportation on system dynamic response[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.

[8] 冯雅薇, 魏庆朝, 时瑾. 直线电机地铁车辆-轨道垂向耦合动力学模型[J]. 北京交通大学学报, 2006(1): 51-54.
FENG Yawei, WEI Qingchao, SHI Jin. Vertical coupled dynamics model of linear motor subway vehicles and tracks [J]. Journal of Beijing jiaotong university, 2006(1): 51-54.

[9] 顾戌华. 直线电机列车—桥梁系统动力响应与车辆走行性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
GU Xuhua. Research on the dynamic response of linear motor trains and bridge systems and vehicle running behavior [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.

[10] REN S, ROMEIJN A, KLAP K. Dynamic simulation of the maglev vehicle/guideway system[J]. Journal of bridge engineering, 2010, 15(3): 269-278.

[11] 赵春发. 磁悬浮车辆系统动力学研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
ZHAO Chunfa. Maglev vehicle system dynamics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.

[12] 罗英昆, 赵春发, 梁鑫, 等. 小半径竖曲线上磁浮车辆空气弹簧动态响应分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(17): 99-105.
LUO Yingkun, ZHAO Chunfa, LIANG Xin, et al. Dynamic responses of air-spring suspension of a maglev vehicle negotiating a small-radius vertical curved track[J]. Journal of vibration and shock, 2020, 39(17): 99-105.

[13] YAN Z, LI G, LUO J, et al. Vibration control of superconducting electro-dynamic suspension train with electromagnetic and sky-hook damping methods[J]. Vehicle system dynamics, 2022, 60(10): 3375-3397.

[14] WATANABE K, YOSHIOKA H, WATANABE E, et al. A study of the vibration control system for a superconducting maglev vehicle[C]//The Japan Society of Mechanical Engineers. The Proceedings of the International Conference on Motion and Vibration Control. Saitama: The Japan Society of Mechanical Engineers, 2002: 907-912.

[15] 陈果, 翟婉明. 铁路轨道不平顺随机过程的数值模拟[J]. 西南交通大学学报, 1999(2): 13-17.
CHEN Guo, ZHAI Wanming. Numerical simulation of railway track irregularity random process[J]. Journal of southwest jiaotong university, 1999(2): 13-17.

Impact of track irregularities on the motor suspension of high-temperature superconducting maglev trains

ZHENG Jie[1], HE Peiheng[2], LI Qiang[1], DENG Bin[1], DENG Zigang[2]

(1. Engineering Research Center of Advanced Drive Energy Saving Technologies, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: In the operation, high-temperature superconducting maglev trains are susceptible to the impact of random track irregularities. These irregularities cause vibrations of the carbody and maglev frame, which are transferred to the dynamic components of the linear motor, resulting changes in the air gap. The changed electromagnetic force reacts against the motor suspension system, causing further vibrations of the maglev frame and carbody. The coupled vibrations of both components influence the safe operation of high-temperature superconducting maglev trains to some extent. To mitigate the influence of random track irregularities on the motor suspension system, a multi-rigid-body dynamic theory model was established in this study. Through simulation verification of the dynamic response under periodic excitations, the correctness of the dynamic theory model was confirmed. Furthermore, within UM software, with the linear motor normal force and random track irregularities as external excitations, a simulation of the dynamics model of the high-temperature superconducting maglev train was conducted. The influence of the vertical stiffness of the motor suspension system on the air gap of the linear motor, the vibration of the carbody and suspension frame, and the train ride comfort was studied, and the optimal value for this stiffness was determined. The results show that increasing the vertical stiffness of the linear motor suspension system to a certain extent can improve the stability of the carbody. Additionally, increasing the vertical stiffness can reduce the variation in the air gap and motor vibration to a certain extent, thus decreasing the coupling effect with the suspension frame. The results obtained in this study are based on simulation analysis under specific structural parameters and load conditions, and they can provide valuable insights for the dynamic analysis of high-temperature superconducting maglev trains.

Keywords: random track irregularities; normal force; high-temperature superconducting maglev train; linear motor suspension; UM

收稿日期：2023-06-20