

# 基于 UM 仿真软件的高速磁浮列车轨道不平顺的动力学响应研究\*

王树宏<sup>1,2,5</sup> 高 锋<sup>3</sup> 高定刚<sup>4\*\*</sup> 杜志勇<sup>3</sup> 董达善<sup>5</sup>

(1. 上海复合材料科技有限公司, 201112, 上海; 2. 上海航天树脂基复合材料工程技术中心, 201112, 上海;  
3. 中车株洲电力机车有限公司, 412001, 株洲; 4. 同济大学国家磁浮交通工程技术研究中心, 201804, 上海;  
5. 上海海事大学物流工程学院, 201306, 上海//第一作者, 助理工程师)

**摘 要** 考虑轨道不平顺因素, 提出了一种基于 UM 仿真软件的高速磁浮列车轨道不平顺动力学研究策略。首先, 实况下测量当磁浮列车的运行速度为 300 km/h 和 430 km/h 时, 左右测点的不平顺变化幅值范围及其增加量值。然后, 通过将轨道不平顺谱导入 UM 软件, 并基于所搭建的高速磁浮列车模型, 验证基于 UM 仿真模拟高速磁浮列车在此条线路运行的可行性。最后, 将不平顺条件放宽至现有不平顺标准最大幅值(-4.3 mm, +3.8 mm)。通过仿真分析可知, 当运行速度为 430 km/h 和 500 km/h 时, 高速磁浮列车仍可安全运行。当运行速度为 600 km/h 时, 不平顺幅值增大为 1.1 倍和 1.2 倍时, 高速磁浮列车仍可安全运行。但当不平顺幅值增大至 1.3 倍时, 悬浮间隙最大值将超出下限值 18 mm, 导致高速磁浮列车不能安全运行。

**关键词** 高速磁浮列车; 轨道不平顺; 动力学响应

**中图分类号** U270.1<sup>+</sup>1; U237

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2022.09.014

maglev train model, the feasibility of high-speed maglev train running on this line is simulated based on UM. Finally, the irregularity condition is extended to the current standard maximum amplitude (-4.3 mm, +3.8 mm). The simulation analysis shows that the high-speed maglev train can still run safely when the running speed is 430 km/h and 500 km/h. At a running speed of 600 km/h, the high-speed maglev train can run safely when irregularity amplitude is increased to be 1.1 and 1.2 times of the original value. When irregularity amplitude is increased to be 1.3 times, the maximum suspension gap value will exceed the lower limit by 18 mm, which causes the high-speed maglev train failing to run safely.

**Key words** high-speed maglev train; track irregularity; dynamic response

**First-author's address** Shanghai Composites Technology Co., Ltd., 201112, Shanghai, China

## Research on Dynamic Response of High-speed Maglev Train Track Irregularity Based on UM Simulation Software

WANG Shuhong, GAO Feng, GAO Dinggang, DU Zhiyong, DONG Dashan

**Abstract** Considering track irregularity factor, a track irregularity dynamic research strategy based on UM simulation software for high-speed maglev train is proposed. Firstly, the range of irregularity change amplitude and the increase amount at the left and right measuring points are measured under real working condition with the maglev train of running speed at 300 km/h and 430 km/h. Then, the track irregularity spectrum is imported into UM. Through an established high-speed

轨道不平顺是列车振动的主要干扰源, 对列车的安全性、稳定性和乘客舒适度都具有重要影响。较高的运行时速使得高速磁浮列车和线路的动态效应更为明显, 由此引发的列车振动效应也更加严重。因此, 有必要对高速磁浮列车的轨道不平顺性进行深入研究。

轨道表面粗糙度、轨道加工误差、安装误差和路基沉降等因素会导致轨道不平顺问题, 进而对磁浮列车悬浮系统性能产生不利影响。文献[1]详细说明了轨道不平顺干扰对悬浮性能的影响, 通过控制器优化方法抑制干扰, 并采用 PnP(即插即用)控制架构法进行在线优化, 进而排除干扰。为了抑制

\* 国家重点研发计划项目(2016YBF1200602); 磁浮交通车辆系统集成湖南省重点实验室项目(2018TP1035); 湖南省科技创新计划项目(2018GK1010)

\*\* 通信作者

后悬浮间隙振动,文献[2]参考前悬浮单元信息,提出一种自适应振动控制方法。在实际运行中,磁浮系统的稳定性除了受轨道不平顺的影响外,还会因传感器放置位置的不同而表现出不同的动态特性。文献[3]提出了一种适用于高速磁浮运行的测量和数据处理方法。文献[4]提出一种基于传感器位置的优化框架,并基于此框架获得了不同速度下的最佳传感器位置,有效减小了两个磁浮间隙的偏差幅度及差异,从而提高了电磁悬浮系统的动态性能。文献[5]提出一种基于自适应滤波器的间隙估计算法,实现了悬浮间隙与位置测量的解耦。

UM(Universal Machanism)仿真软件是由俄罗斯布良斯克国立大学开发的计算多体系统动力学的软件,已广泛应用于铁道工程、轨道车辆、轮式车辆、履带车辆、航空航天和机器人等领域。本文选取高速磁浮列车模型,通过控制算法建立垂向动力学模型,并基于 UM 仿真软件选取某条长定子磁浮轨道不平顺谱进行动力学仿真,研究其在不同速度以及不平顺幅值下,对垂向运动平稳性的影响。本文研究可为后续高速磁浮运行试验提供理论基础。

## 1 高速磁浮列车动力学模型

高速磁浮列车的悬浮结构如图 1 所示。

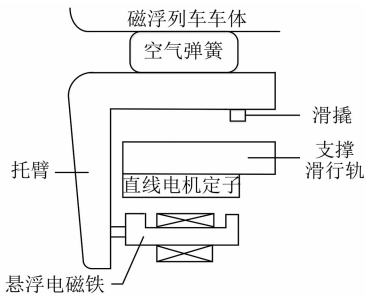


图 1 磁浮列车悬浮系统结构

Fig. 1 Maglev train suspension system structure

在竖直方向上对悬浮系统进行动态分析,适当简化后可以建立如下动态模型<sup>[6]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} F &= k \left( \frac{I}{S} \right)^2 \\ k &= \frac{u_0 A N^2}{4} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:

- $F$ ——电磁力,N;
- $k$ ——电磁常数,H·m;
- $A$ ——电磁铁有效面积,m<sup>2</sup>;

- $N$ ——线圈匝数;
- $u_0$ ——真空磁导率,H/m;
- $I$ ——励磁电流,A;
- $S$ ——悬浮电磁铁与定子间的气隙,m。

## 2 现有轨道不平顺标准

### 2.1 轨道梁的定位精度

轨道梁的定位精度要满足相对于空间曲线和线路柱位理论位置的安装公差要求:

- 1)  $X$  向:±1 mm (参考位置为固定支座轴线);
- 2)  $Y$  向:±1 mm (参考位置为距固定支座轴线 100 mm 处的两侧侧面导向轨中心);
- 3)  $Z$  向:±1 mm (参考位置为距固定支座轴线 100 mm 处的定子底面中心)。

定子铁心安装间隙如图 2 所示。

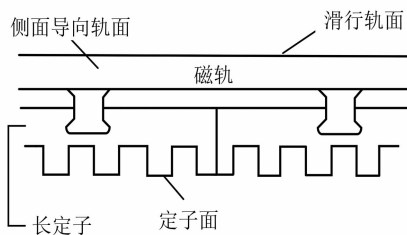


图 2 定子铁心安装间隙

Fig. 2 Installation clearance of stator core

### 2.2 轨道梁的制造精度

在轨道结构力学性能方面,根据结构刚度的要求,磁浮列车系统要求轨道结构在受到列车荷载及外界环境(如温度变化和风力等)等因素影响时,其变形和挠度应控制在很小的范围内。如要求单跨简支轨道梁在静车载作用下,跨中挠度应小于  $L/4\ 800$  ( $L$  为简支梁跨径),而公路及铁路的一般要求仅为小于  $L/600 \sim L/800$ 。

此外,磁浮列车系统对轨道功能区提出了严格的制造精度要求,对 3 个功能面的制造安装精度要求基本都小于 1 mm。这是因为其直接影响轨道结构的设计制造精度要求。如轨道梁采用预应力混凝土梁时,由混凝土收缩、徐变等引起的轨道梁跨中竖向变形须控制在 1 mm 以内。

### 2.3 功能面的测量公差

功能面(包括定子面、侧向导向轨面和滑行轨面)可直接测量的公差,如位置偏差、定子相互之间的错位、定子相互之间的间隙、轨道宽度和钳距等,如表 1 所示。

表 1 位置偏差与错位

Tab. 1 Position deviation and dislocation

功能面	方向	允许位置 偏差/mm	允许错位/mm		轨道宽度 公差/mm
			梁跨内	梁端	
定子面	X	2.0			
	Y	2.0			
	Z		0.4	0.6	
侧面 导向 轨面	X	+1.5/-5.0			
	Y		0.4	1.0	1.0
	Z	10.0			
滑行 轨面	X				
	Y	16.0			
	Z		0.2	0.6	

在实际应用时,选取  $L=24\text{ m}$ , 同时考虑制造安装精度, 取  $Z$  方向不平顺幅值为  $(-4.3\text{ mm}, +3.8\text{ mm})$ 。

3 仿真分析

3.1 某条长定子磁浮线实测数据与 UM 仿真软件数据对比

3.1.1 实测数据

为分析磁浮列车在运行过程中的悬浮性能,对悬浮架左、右 2 个测点(记为  $M_L$  和  $M_R$ )的悬浮间隙进行分析。某条长定子磁浮线的实测数据如表 2 所示。

表 2 实测悬浮间隙统计值

Tab. 2 Statistics of the measured suspension gap

工况	测点	悬浮间隙 最小值/mm	悬浮间隙 最大值/mm	悬浮间隙 波动范围/mm
运行速度 为 300 km/h	$M_L$	7.380	15.350	$8.600^{+6.750}_{-1.220}$
	$M_R$	7.000	15.310	$8.600^{+6.710}_{-1.600}$
运行速度 为 430 km/h	$M_L$	6.930	16.560	$9.100^{+7.460}_{-2.170}$
	$M_R$	7.130	15.570	$9.100^{+6.470}_{-1.970}$

由表 2 可知,当磁浮列车速度为 300 km/h 时,左轨测点的间隙波动为 7.970 mm,右轨测点的间隙波动为 8.310 mm;当磁浮列车速度为 430 km/h 时,左轨测点的间隙波动为 9.630 mm,右轨测点的间隙波动为 8.440 mm。随着运行速度的提高,磁浮列车的悬浮间隙波动逐渐加剧,左轨测点的间隙波动增加了 1.660 mm,右轨测点的间隙波动增加了 0.130 mm。

3.1.2 UM 仿真软件数据

某条长定子磁浮感应面不平顺谱的 UM 仿真数据如图 3 所示。由图 3 可知,其高低不平顺幅值在  $\pm 4.000\text{ mm}$  内波动,符合现有的不平顺标准。选取柔性梁跨长为 24 m,共计 42 段。当悬浮列车的

运行速度分别为 300 km/h 和 430 km/h 时,悬浮间隙的时间历程图如图 4 所示。

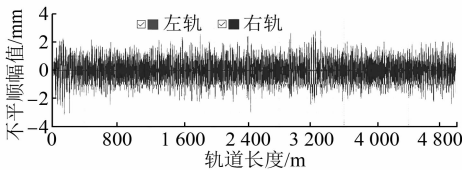


图 3 某条长定子磁浮感应面不平顺谱

Fig. 3 Irregularity spectrum of a long stator maglev induction surface

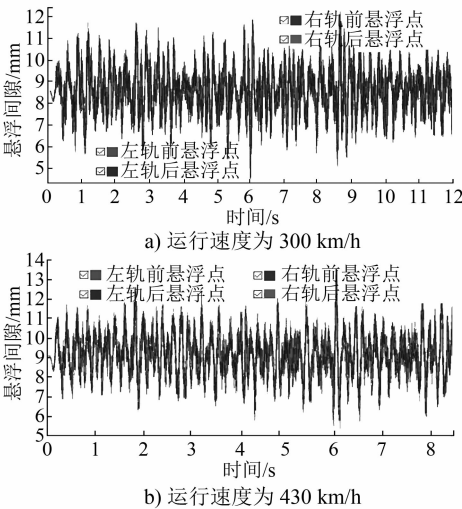


图 4 不同运行速度下的悬浮间隙时间历程图

Fig. 4 Time-history diagram of suspension clearance at different running speeds

由图 4 的仿真数据可以获得悬浮间隙的统计值,如表 3 所示。由于左右轨的前悬浮点幅值变化较大,所以以其表示左右轨的统计值。

表 3 运行速度为 300 km/h 和 430 km/h 时的仿真悬浮间隙统计值

Tab. 3 Statistics of simulation suspension clearance at running speeds of 300 km/h and 430 km/h

工况	测点	悬浮间隙 最小值/mm	悬浮间隙 最大值/mm	悬浮间隙 波动范围/mm
运行速度 为 300 km/h	$M_L$	5.160	12.240	$8.600^{+3.640}_{-3.440}$
	$M_R$	4.550	11.850	$8.600^{+3.250}_{-4.050}$
运行速度 为 430 km/h	$M_L$	5.200	13.560	$9.100^{+4.460}_{-3.900}$
	$M_R$	5.930	13.560	$9.100^{+4.460}_{-3.170}$

由表 3 可知,当磁浮列车速度为 300 km/h 时,左轨测点的间隙波动为 7.080 mm,右轨测点的间隙波动为 7.300 mm;当磁浮列车速度为 430 km/h 时,左轨测点的间隙波动为 8.360 mm,右轨测点的间隙波动为 7.630 mm。随着运行速度的提高,磁

浮列车的悬浮间隙波动逐渐加剧,左轨测点的间隙波动增加了 1.280 mm,右轨测点的间隙波动增加了 0.330 mm。

通过以上计算分析,某条长定子磁浮线实测左轨测点的间隙波动范围增加为 1.660 mm,而 UM 软件仿真左轨测点的间隙波动范围增加为 1.280 mm,两者相差 0.380 mm(约 23%)。由此可见,用 UM 软件仿真进行初步定量分析是可行的,仿真计算值偏安全,后续悬浮间隙实测统计值可按仿真悬浮间隙统计值进行比例修正。

### 3.2 运行速度提高后的影响分析

目前,某条长定子磁浮线的高速磁浮列车最高运行速度为 430 km/h。在 UM 软件中将运行速度提升至 500 km/h 与 600 km/h,分析在目前的不平顺谱下,高速磁浮列车能否顺利通过而不发生撞车与撞轨事故。高速磁浮列车运行速度为 500 km/h 与 600 km/h 时的仿真悬浮间隙统计值如表 4 所示。

表 4 运行速度为 500 km/h 和 600 km/h 时的仿真悬浮间隙统计值

Tab. 4 Statistics of simulation suspension clearance at running speeds of 500 km/h and 600 km/h

工况	测点	悬浮间隙 最小值/mm	悬浮间隙 最大值/mm	悬浮间隙 波动范围/mm
运行速度 为 500 km/h	M <sub>L</sub>	5.770	14.500	9.500 <sup>+5.000</sup> <sub>-3.730</sub>
	M <sub>R</sub>	6.170	13.680	9.500 <sup>+4.180</sup> <sub>-3.330</sub>
运行速度 为 600 km/h	M <sub>L</sub>	5.620	16.360	10.000 <sup>+6.360</sup> <sub>-4.380</sub>
	M <sub>R</sub>	5.580	15.870	10.000 <sup>+5.870</sup> <sub>-4.420</sub>

为了更贴合实际运行情况,将仿真悬浮间隙统计值进行比例修正,以获得实测悬浮间隙统计值。利用回归分析将磁浮列车速度、仿真悬浮间隙统计值作为自变量,实测悬浮间隙统计值作为因变量,求解线性回归方程,以便进一步修正实测悬浮间隙统计值。求解公式如下:

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 \tag{2}$$

式中:

- y——实测悬浮间隙统计值;
- $x_1, x_2$ ——分别为磁浮列车速度及仿真悬浮间隙统计值;
- $a_1, a_2$ ——回归系数。

以磁浮列车左轨为例,经过计算可得,当运行速度为 500 km/h 和 600 km/h 时,实测悬浮间隙统计值分别为 9.500<sup>+5.880</sup><sub>-4.380</sub> mm 和 10.000<sup>+7.440</sup><sub>-5.130</sub> mm。根据

表 4 以及实测悬浮间隙统计值,画出在此条件下的左轨悬浮间隙幅值对比图,如图 5 所示。

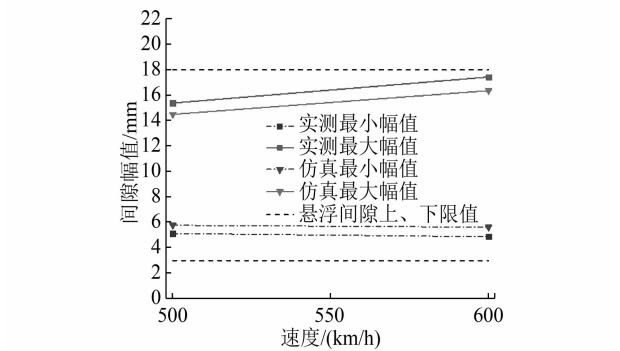


图 5 运行速度为 500 km/h 与 600 km/h 时的左轨间隙幅值  
Fig. 5 Amplitude diagram of left rail clearance at running speeds of 500 km/h and 600 km/h

已知高速磁浮落车时的初始间隙为 25.000 mm,保证上下都不碰撞的间隙上限为 3.000 mm,下限为 18.000 mm。由图 5 可知,当运行速度为 500 km/h 与 600 km/h 时,其仿真以及实测间隙幅值均在所要求范围内,故高速磁浮列车能够以 500 km/h 与 600 km/h 的运行速度在该条长定子磁浮线行驶。

### 3.3 不平顺性条件放宽后的影响分析

放大某条长定子磁浮线的不平顺谱幅值,分别取原不平顺谱幅值的 1.1 倍、1.2 倍和 1.3 倍,放大后的幅值如表 5 所示。当运行速度分别为 430 km/h、500 km/h 和 600 km/h 时,对不同不平顺幅值进行仿真分析,其悬浮间隙统计值如表 6~8 所示。

表 5 放大后的不平顺谱幅值范围  
Tab. 5 Amplitude of amplified irregularity spectrum

放大倍数	不平顺幅值范围/mm	
	M <sub>L</sub>	M <sub>R</sub>
1.0	(-3.110, +2.820)	(-2.700, +2.660)
1.1	(-3.421, +3.102)	(-2.970, +2.926)
1.2	(-3.732, +3.384)	(-3.240, +3.192)
1.3	(-4.043, +3.666)	(-3.510, +3.458)

根据表 6~8,当磁浮列车的运行速度分别为 430 km/h、500 km/h 和 600 km/h 时,不平顺幅值放大后的悬浮间隙幅值变化如图 6 所示。由图 6 可知,当运行速度为 430 km/h 和 500 km/h,不平顺幅值分别增大 1.1 倍、1.2 倍和 1.3 倍时,间隙幅值为 3~18 mm,故在现有不平顺标准的最大幅值 (-4.300 mm,+3.800 mm)下,高速磁浮列车仍可安全运行。当运行速度为 600 km/h,不平顺幅值分别增大 1.1 倍和 1.2 倍时,其间隙幅值满足安全运行要

表 6 当运行速度为 430 km/h 时的不平顺幅值放大后的悬浮间隙统计值

Tab. 6 Statistics of suspension clearance after amplification of irregularity amplitude at running speed of 430 km/h

放大倍数	测点	悬浮间隙 最小值/mm	悬浮间隙 最大值/mm	悬浮间隙 波动范围/mm
1.1	M <sub>L</sub>	4.840	13.910	9.100 <sup>+4.810</sup> <sub>-4.260</sub>
	M <sub>R</sub>	5.620	13.940	9.100 <sup>+4.840</sup> <sub>-3.480</sub>
1.2	M <sub>L</sub>	4.490	14.260	9.100 <sup>+5.160</sup> <sub>-4.610</sub>
	M <sub>R</sub>	5.400	14.320	9.100 <sup>+5.220</sup> <sub>-3.700</sub>
1.3	M <sub>L</sub>	4.140	14.620	9.100 <sup>+5.520</sup> <sub>-4.960</sub>
	M <sub>R</sub>	5.000	14.700	9.100 <sup>+5.600</sup> <sub>-4.100</sub>

表 7 当运行速度为 500 km/h 时的不平顺幅值放大后的悬浮间隙统计值

Tab. 7 Statistics of suspension clearance after amplification of irregularity amplitude at running speed of 500 km/h

放大倍数	测点	悬浮间隙 最小值/mm	悬浮间隙 最大值/mm	悬浮间隙 波动范围/mm
1.1	M <sub>L</sub>	5.560	14.990	9.500 <sup>+5.490</sup> <sub>-3.940</sub>
	M <sub>R</sub>	5.950	14.040	9.500 <sup>+4.540</sup> <sub>-3.550</sub>
1.2	M <sub>L</sub>	5.350	15.490	9.500 <sup>+5.990</sup> <sub>-4.150</sub>
	M <sub>R</sub>	5.730	14.380	9.500 <sup>+4.880</sup> <sub>-3.770</sub>
1.3	M <sub>L</sub>	5.170	16.000	9.500 <sup>+6.500</sup> <sub>-4.330</sub>
	M <sub>R</sub>	5.560	14.630	9.500 <sup>+5.130</sup> <sub>-3.940</sub>

表 8 当运行速度为 600 km/h 时的不平顺幅值放大后的悬浮间隙统计值

Tab. 8 Statistics of suspension clearance after amplification of irregularity amplitude at running speed of 600 km/h

放大倍数	测点	悬浮间隙 最小值/mm	悬浮间隙 最大值/mm	悬浮间隙 波动范围/mm
1.1	M <sub>L</sub>	5.540	16.890	10.000 <sup>+6.890</sup> <sub>-4.460</sub>
	M <sub>R</sub>	5.340	16.310	10.000 <sup>+6.310</sup> <sub>-4.660</sub>
1.2	M <sub>L</sub>	5.230	17.380	10.000 <sup>+7.380</sup> <sub>-4.770</sub>
	M <sub>R</sub>	5.220	16.710	10.000 <sup>+6.710</sup> <sub>-4.780</sub>
1.3	M <sub>L</sub>	5.140	18.030	10.000 <sup>+8.030</sup> <sub>-4.860</sub>
	M <sub>R</sub>	4.910	17.190	10.000 <sup>+7.190</sup> <sub>-5.090</sub>

求;但当不平顺幅值增大至 1.3 倍时,间隙幅值的最大值会超出下限值 18 mm,不满足安全运行要求,故若高速磁浮列车要以 600 km/h 的运行速度安全运行,需将不平顺幅值控制在原值的 1.2 倍以内,即(−3.732 mm,+3.384 mm)。

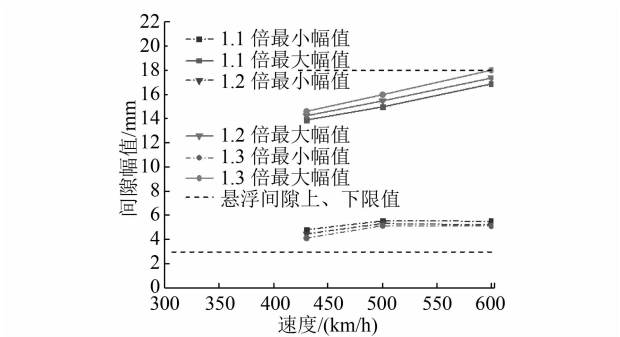


图 6 运行速度为 430 km/h、500 km/h 和 600 km/h 时不平顺幅值放大后的悬浮间隙

Fig. 6 Suspension clearance after amplification of irregularity amplitudes at running speed of 430 km/h, 500 km/h, and 600 km/h

## 4 结语

本文提出了一种基于 UM 软件的高速磁浮列车轨道不平顺研究策略,通过对比实测与仿真的间隙波动增加值,验证了基于 UM 软件仿真模拟高速磁浮列车在此条线路的运行是可行的。当运行速度为 500 km/h 与 600 km/h 时,其间隙幅值均在所要求范围内。随后,将不平顺条件放宽至现有不平顺标准的最大幅值,当运行速度为 430 km/h 与 500 km/h 时,分别增大 1.1 倍、1.2 倍和 1.3 倍不平顺幅值的情况下,高速磁浮列车仍可安全运行。对于运行速度为 600 km/h 的情况,增大 1.1 倍和 1.2 倍不平顺幅值时,高速磁浮列车仍可安全运行,但当原不平顺幅值增大至 1.3 倍时,间隙幅值的最大值会超出下限值,列车不能安全运行。

## 参考文献

[1] WANG Z, LONG Z, LI X. Track irregularity disturbance rejection for maglev train based on online optimization of PnP control architecture[J]. IEEE Access, 2019, 7: 12610.

[2] ZHOU D, YU P, WANG L, et al. An adaptive vibration control method to suppress the vibration of the maglev train caused by track irregularities[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 408: 331.

[3] SHI J, FANG W S, WANG Y J, et al. Measurements and analysis of track irregularities on high speed maglev lines[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2014, 15(6): 385.

[4] LI Y, ZHOU D, CUI P, et al. Dynamic performance optimization of electromagnetic levitation system considering sensor position[J]. IEEE Access, 2020, 8: 29446.