

典型气动荷载作用下磁浮列车动力学特性研究

南凯威^{1, 2}, 刘梦娟^{1, 2}, 郝占宙^{1, 2}, 吴晗¹, 孙振旭^{1, 2, *}

1. 中国科学院 力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190

2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049

摘要: 研究强气动荷载作用下磁浮列车的动力学特性对磁浮列车的悬浮稳定设计有重要意义。本文基于简化的 TR08 型磁浮列车, 采用滑移网格方法, 研究了明线单车运行和会车场景下作用在列车上的瞬态气动荷载特性、气动荷载振荡的来源及气动荷载作用下列车的动力学特性。结果表明: TR08 型磁浮列车受到的气动荷载随速度的增大而增大, 总体呈现尾车 > 头车 > 中车的规律。俯仰力矩在气动荷载中占主导地位, 是影响列车安全运行最重要的因素。列车气动荷载振荡主要由下部结构引起, 与上/下部结构相比, 单节列车俯仰力矩的峰值出现了迟滞现象, 偏航力矩则无此现象。单车以 600 km/h 的速度运行时, 悬浮磁铁间隙波动的幅值将超过安全极限; 以 600 km/h 的速度交会时, 将发生失稳。本文的结论可为磁浮列车的稳定设计提供参考。

关键词: 磁浮列车; 滑移网格法; 气动荷载; 动力学特性; TR08; 会车

中图分类号: U270; O355

文献标识码: A

Research of dynamic characteristics of maglev train under typical aerodynamic loads

NAN Kaiwei^{1, 2}, LIU Mengjuan^{1, 2}, HAO Zhanzhou^{1, 2}, WU Han¹, SUN Zhenxu^{1, 2, *}

1. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems,

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: This study researched the dynamic characteristics of the TR08 maglev train under strong aerodynamic loads using the sliding grid method. The research investigated the transient aerodynamic load characteristics during open-track single-vehicle operation and meeting scenarios, identified the sources of aerodynamic load oscillation and the train's dynamic characteristics under these loads. Results show that the aerodynamic load of the TR08 maglev train increases with speed, and the pattern is tail train > head train > middle train. The lifting moment is critical for the safe operation of train, and substructure primarily causes load oscillation. The peak value of the pitching moment for a single-segment train shows a hysteresis phenomenon, which is absent in the yawing moment. When single train runs at 600 km/h suspension magnet gap fluctuation exceed safe limits, while when trains meet at 600 km/h instability occurs. This study provides insights into the sources of load oscillation and the train's dynamic characteristics.

Keywords: high-speed maglev train; sliding mesh method; aerodynamic loading; dynamics characteristic; TR08; vehicles meeting

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2023-01-24; 录用日期: 2023-02-20

* 通信作者 E-mail: sunzhenxu@imech.ac.cn

引用格式: 南凯威, 刘梦娟, 郝占宙, 等. 典型气动荷载作用下磁浮列车动力学特性研究 [J]. 实验流体力学, 2023, 37(3): 69-83.

NAN K W, LIU M J, HAO Z Z, et al. Research of dynamic characteristics of maglev train under typical aerodynamic loads [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2023, 37(3): 69-83.

0 引言

作为我国下一代轨道交通工具,高速磁浮列车设计速度达 600 km/h,具有安全、可靠、噪声低、振动小、载客量大等优点。磁浮列车高速运行时,其气动荷载较低速时显著增强^[1]。为保证高速磁浮列车在强气动荷载下运行的安全性、稳定性和舒适性,须深入了解磁浮列车气动荷载的特点,并对气动荷载作用下磁浮列车的动力学特性进行研究。

磁浮列车底部与传统轨道列车有较大不同,故其气动荷载特点明显区别于后者。目前有关磁浮列车气动荷载的研究较多。Siclari 等^[2]采用计算流体力学(CFD)方法,对布置了 5 种不同形状电磁系统(EMS)列车的气动力、气动力矩和表面压力进行了数值模拟。Tyll 等^[3]通过风洞实验验证了这些数值模拟的结果。Wells 和 Britcher^[4]通过风洞实验,测量了横风条件下磁浮列车的气动力和气动力矩。李人宪等^[5]对磁浮列车的气动阻力和升力进行了数值模拟和分析。毕海权等^[6]对磁浮列车的流场和气动力进行了数值模拟。刘堂红等^[7]比较了几种不同外形磁浮列车的气动性能,得到了列车外形与气动阻力、升力和交会压力波的关系。许多学者^[8-13]还对最新的 600 km/h 高速磁浮列车进行了研究,这些研究包括列车在明线和隧道内单车运行和会车场景下的流场、气动荷载和压力波特性等。

由于底部结构不同,磁浮列车的动力学特性相比传统轨道列车也出现了一些新的特点。罗宇豪等^[14]研究了磁浮列车的振动传递问题,结果表明优化垂向减振器阻尼等悬挂参数能够较好地抑制车体振动。陆海英等^[15]研究了磁浮列车起浮阶段的悬浮稳定性问题,发现磁浮列车在弹性轨道梁上起浮时容易发生悬浮失稳的原因是悬浮架与弹性轨道梁发生了共振。刘耀宗等^[16]研究了磁浮列车悬浮架的动力学特性,结果表明悬浮架在低频段具有较好的解

耦性能,但在稍高频段内则存在显著的耦合作用。赵春霞^[17]对高速磁浮列车弯道运行时的导向动力学特性进行了研究。舒瑶等^[18]基于 CFD 方法,研究了横风荷载下磁浮列车的动态响应特性。

可以发现,目前对磁浮列车气动荷载和动力学特性的研究大多侧重于其中一个方面,而对气动荷载作用下磁浮列车动力学特性的研究则相对较少。气动荷载对列车的稳定性有着重要的影响^[19],目前我国正在研发 600 km/h 的高速磁浮列车,随着列车速度的提高,列车系统的稳定性也在发生变化^[20]。在 600 km/h 的速度下,气动荷载对磁浮列车的影响非常显著,特别是当两车交会时,列车会受到强烈的气流冲击。在这样的气动荷载和冲击作用下,列车能否保持悬浮稳定是影响磁浮列车安全性和舒适性的关键因素。

本文以上海磁浮示范线上的 TR08 型列车为研究对象,采用 CFD 方法对明线运行的 3 编组列车的头车、中车和尾车的气动荷载进行了数值模拟,并对气动荷载及其成因进行了分析,然后通过 SIMPACK 和 Simulink 进行联合仿真,建立高速磁浮列车多体结构动力学模型,最后对高速磁浮列车在气动荷载下的动力学响应进行仿真分析,并对整个列车系统的稳定性进行评估。

1 气动荷载模拟方法

1.1 磁浮列车模型

如图 1 所示,本研究使用的列车模型为上海磁浮示范线上的 3 编组全尺寸 TR08 型列车。为满足计算精度,同时考虑计算的经济性,该模型上部忽略了车窗、风挡等构件,只保留了列车的主体结构;下部忽略了悬浮磁铁等构件,但其气动外形与真实列车保持一致。列车高度 $H \approx 3.9$ m,总长度为 $20.0H$,宽度为 $0.9H$,其中头车和尾车外形一致,长度均为 $6.9H$,中间车长度为 $6.2H$ 。

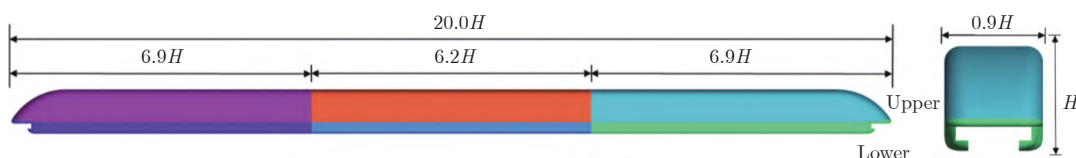


图 1 TR08 型磁浮列车模型

Fig. 1 The model of TR08 maglev train

1.2 控制方程

磁浮列车最大设计速度接近 600 km/h(即马赫数 $Ma \approx 0.5$),因此列车周围的流动为可压缩流动。

在研究时使用雷诺平均 Navier-Stokes(RANS)方程和 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型。

雷诺平均 Navier-Stokes 方程通式可表示为:

$$\frac{\partial \rho \psi}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V} \psi - \Gamma_{\psi} \cdot \text{grad} \psi) = q_{\psi} \quad (1)$$

式中： ρ 为密度； ψ 为通用变量； t 为时间； \mathbf{V} 为速度矢量； Γ_{ψ} 为广义扩散系数； q_{ψ} 为广义源项。

对于连续方程，有：

$$\psi = 1, \Gamma_{\psi} = 0, q_{\psi} = 0 \quad (2)$$

对于 x 方向的动量方程，有：

$$\psi = u, \Gamma_{\psi} = 0, q_{\psi} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}\left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x}\right) \quad (3)$$

式中： u 为 x 方向(即列车运行方向)的速度； μ_{eff} 为有效黏性系数； p 为压力项。 y 方向(即展向)、 z 方向(即竖向)动量方程的表示类似。

对于能量方程，有：

$$\psi = T, \Gamma_{\psi} = \frac{\lambda}{C_p}, q_{\psi} = \frac{S_h}{C_p} \quad (4)$$

式中： T 为温度； C_p 为比热容； λ 为导热系数； S_h 为内热源。

对于湍动能方程，有：

$$\psi = k, \Gamma_{\psi} = \mu + \frac{\mu_t}{Pr_k}, q_{\psi} = G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

式中： k 为湍流脉动动能； μ 为层流黏性系数； μ_t 为湍流黏性系数； Pr_k 为脉动动能普朗特数； G_k 为湍流生成项； ε 为耗散率。

对于湍流耗散率方程，有：

$$\psi = \varepsilon, \Gamma_{\psi} = \frac{\mu_{\text{eff}}}{Pr_{\varepsilon}}, q_{\psi} = \frac{\varepsilon}{k} \left(C_1 G_k - C_2 \rho \varepsilon \frac{k}{k + \sqrt{v \varepsilon}} \right) \quad (6)$$

式中： Pr_{ε} 为耗散率的普朗特数； C_1 和 C_2 为经验常数； ν 为运动黏性系数。

理想气体状态方程为：

$$p = \rho RT \quad (7)$$

式中： R 为气体摩尔常数。

控制方程使用有限体积法进行离散，并采用基于压力的可压缩求解器和 SIMPLE 算法求解压力-速度耦合方程。对于空间项的离散，使用最小二乘单元计算控制体内的梯度。对流扩散项的离散采用二阶迎风格式。时间推进采用一阶隐式格式。

1.3 计算域和边界条件

如图 2(a) 所示，整个计算域分为 3 个部分：V_IN_P、V_IN_N 和 OUTER。V_IN_P 包含的列车沿 $x+$ 方向运行，V_IN_N 包含的列车沿 $x-$ 方向运行，OUTER 为外部流场。OUTER 为半径 25 m、长度 1124 m 的半圆柱体，半圆柱体的两端和侧面的边界条件设置为 Pressure-outlet，地面和轨道部分的边界条件设置为 Wall。为了实现滑移网格的相对运动，V_IN_P、V_IN_N 与 OUTER 之间的边界条件设置为 Interface，如图 2(b) 中黑色线条所示。在 2 辆列车开始运动前，为保证列车运行时的流场得到充分发展，2 车车头的初始距离设置为 728 m。2 条平行轨道的间距设置为 5.1 m。在会车场景下，为了确保模拟的一致性，列车相向运行的速度(沿 $x+$ 和 $x-$ 方向)相同。单车明线运行时(磁浮列车在一条轨道上运行，另一条轨道上没有列车)，使用相同的计算模型和网格进行模拟。

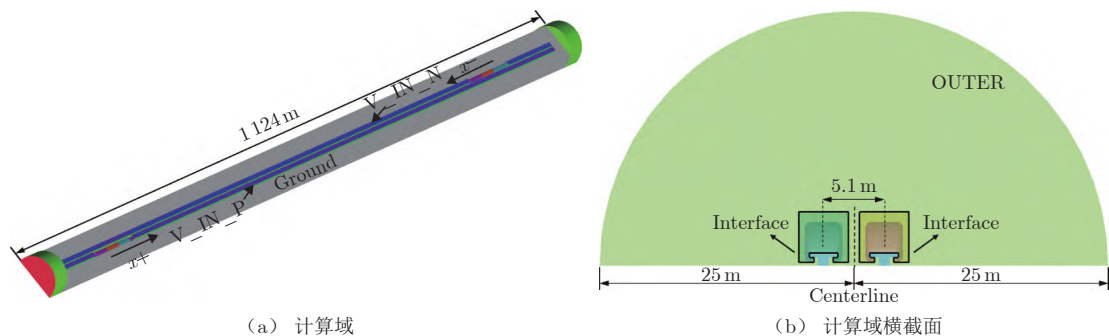


图 2 计算域和边界条件示意图

Fig. 2 Schematic of computational domain and boundary conditions

1.4 网格划分与独立性验证

图 3 展示了滑移网格的布置，在 V_IN_P(或 V_IN_N) 区域包含了 2 种网格：车体附近为四面体的非结构网格(Unstructured mesh)，车体远场部分为结构网格(Structured mesh)。非结构网格和结构

网格的交界处设置为混合界面(Hybrid surface)。具体网格设置如下：在车体表面设置 10 层边界层， y^+ 的变化范围为 30~100，近壁面第一层网格厚度为 0.264 mm，拉伸比为 1.2。为验证所使用网格的独立性，建立 2 种尺寸的非结构网格：粗网格(7.8 ×

10^6 个网格单元)和细网格(2.3×10^7 个网格单元)。2种网格计算得到的交会过程中车气动升力曲线如图4所示。从图中可以看到,基于2种网格计算得到的气动升力曲线仅峰值稍有差别。对于更为简单的单车运行场景,粗细网格计算的气动升力曲线差别在1%左右。上述结论表明,网格尺寸对计算结果的

影响非常有限,但为获得更为准确的气动荷载数据,本文使用细网格进行模拟。为提高采用滑移网格方法计算时的收敛性,列车的运动包含了启动加速和匀速运行2部分。为了实现启动加速和匀速运行过程,需编写一个用户自定义函数(UDF)来定义磁浮列车的运动。

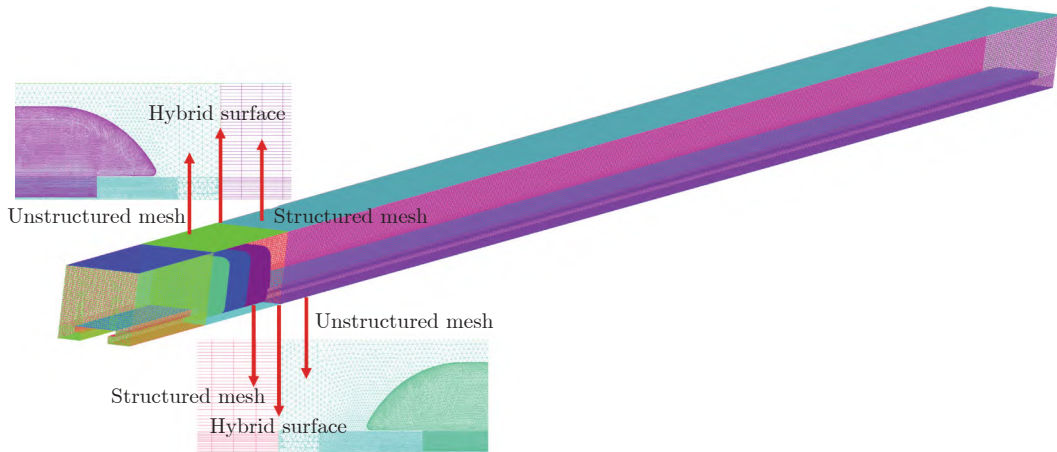


图3 滑移网格法示意图

Fig. 3 Schematic of sliding mesh method

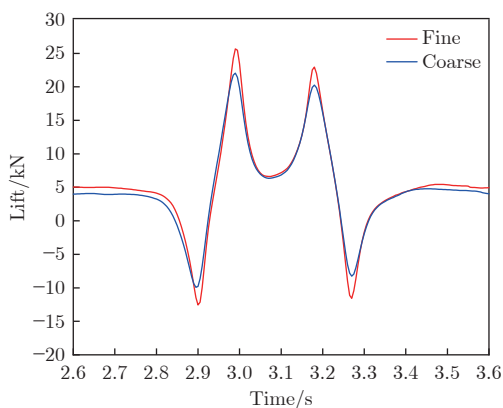
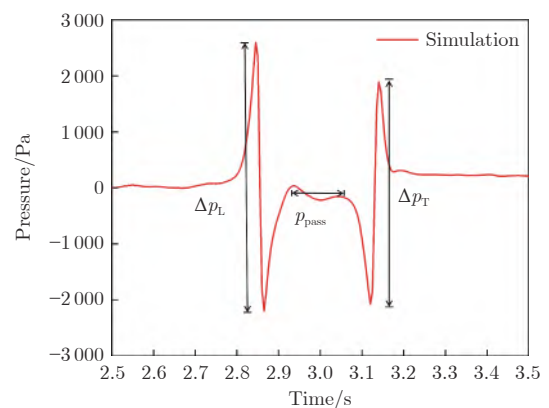


图4 粗网格和细网格计算的气动升力比较

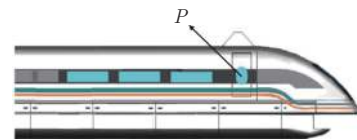
Fig. 4 Comparison of the lift force of coarse mesh and fine mesh

1.5 计算方法验证

为验证CFD方法的有效性,将数值模拟的结果与Li等^[21]2003年11月在上海对500 km/h的磁浮列车进行气动荷载实验的结果进行了对比。从图5(a)中可以看出,列车车门上P点(测点位置见图5(b))瞬态压力曲线有2个波动过程:列车交会引起的正-负波动(头波)和负-正波动(尾波)。表1比较了数值模拟和实验得到的头波压力幅值(Δp_L)、尾波压力幅值(Δp_T)和列车交会时的压力均值(p_{pass}),可以看到,数值模拟和实验结果的相对误差很小,最大的误差为3.82%(尾波压力幅值),验证了本文所用CFD方法的准确性。



(a) 测点P压力曲线



(b) 测点P位置

图5 CFD方法有效性验证

Fig. 5 Verification of the validity of CFD simulation

表1 数值模拟与实车实验压力对比
Table 1 Comparison of pressure

	数值模拟结果/Pa	实车实验结果/Pa	相对误差
Δp_L	4834	4757	1.62%
p_{pass}	330	324	1.85%
Δp_T	3804	3955	3.82%

2 速度对气动力和气动力矩的影响

上海磁浮示范线上的 TR08 型列车最高运行速度为 430 km/h，最高实验速度为 501 km/h。为进一步探究该型列车的气动性能，图 6~8 给出了单车以 300、400、500 和 600 km/h 的速度运行时头车、中车和尾车的气动力时程曲线。为获得作用在列车上的真实效果，气动力和气动力矩的参考点均选在车厢的质心。可以看到，由于气流的非定常效应，每条气动力曲线都会发生振荡，且振荡随着速度的增大而加剧。头车和尾车都受到方向向上且剧烈振荡的升力(蓝色曲线)，这可能会导致列车不稳定，进而诱发严重的安全问题，尤其是当列车以 500~600 km/h 的速度运行时，升力的振荡变得更为剧烈。与升力相比，侧向力(红色曲线)的振荡几乎为 0，阻力(黑色曲线)的振荡也小得多。图 9~11 给出了单车以

300、400、500 和 600 km/h 的速度运行时头车、中车和尾车的气动力矩时程曲线。从图中可以看到，列车受到的俯仰力矩(红色曲线)最为显著，且一直在剧烈振荡，这主要是由升力振荡引起的。头车的俯仰力矩为负值，尾车的俯仰力矩为正值，其原因在于头车和尾车周围压力分布不同。与俯仰力矩相比，滚动力矩(黑色曲线)和偏航力矩(蓝色曲线)数值很小，几乎可以忽略不计。与头车和尾车相比，中车的气动力和气动力矩虽然也会发生振荡，但其数值较小，对列车的安全运行影响不大。

图 12 为单车明线运行时气动力和气动力矩时均值随速度的变化曲线。可以看到，随着速度的增大，头车和尾车受到的阻力、升力和俯仰力矩时均值显著增大；侧向力和滚动力矩也在增大，但其数值较小。另外，尾车的偏航力矩和俯仰力矩变化量远大于头车，这主要是由于气流在沿车体发展过程中，非

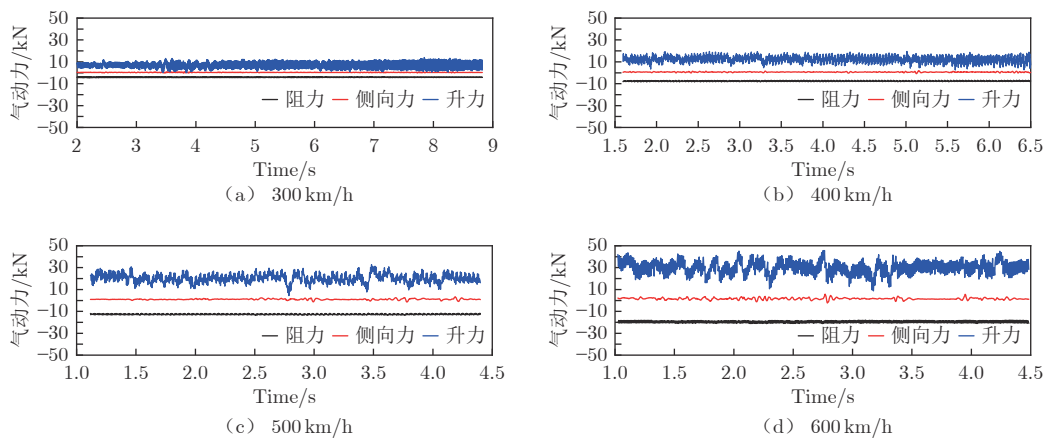


图 6 头车气动力时程曲线

Fig. 6 Histories of aerodynamic forces of the head train

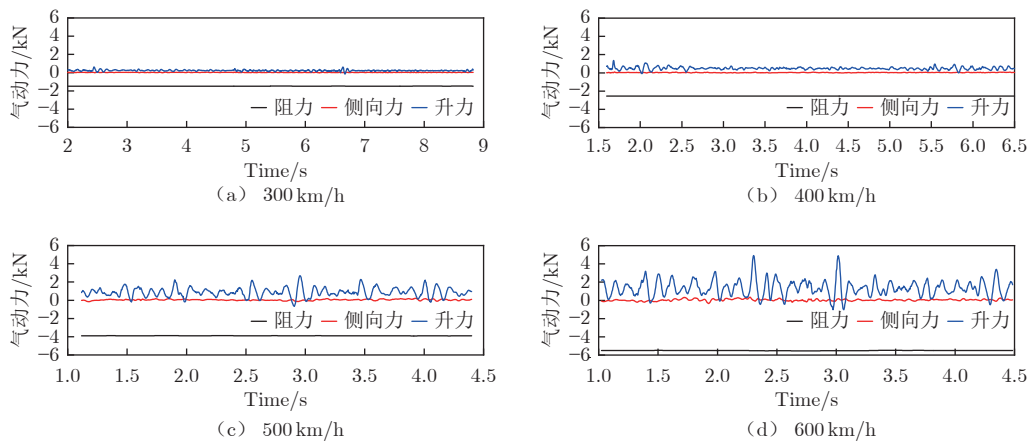


图 7 中车气动力时程曲线

Fig. 7 Histories of aerodynamic forces of the middle train

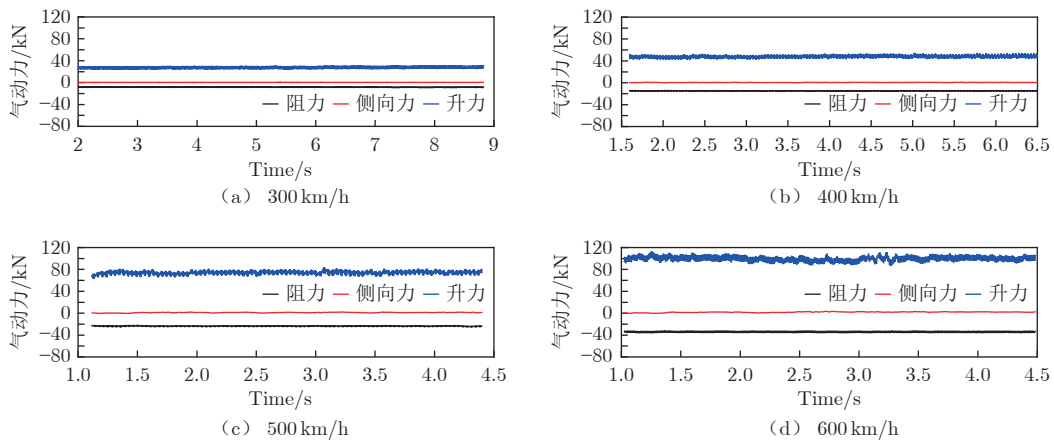


图 8 尾车气动力时程曲线

Fig. 8 Histories of aerodynamic forces of the rear train

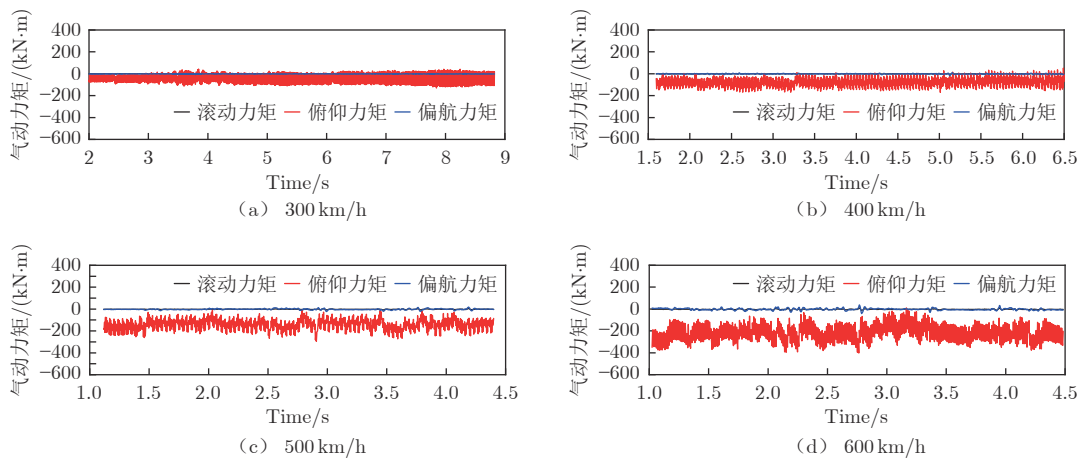


图 9 头车气动力矩时程曲线

Fig. 9 Histories of aerodynamic moments of the head train

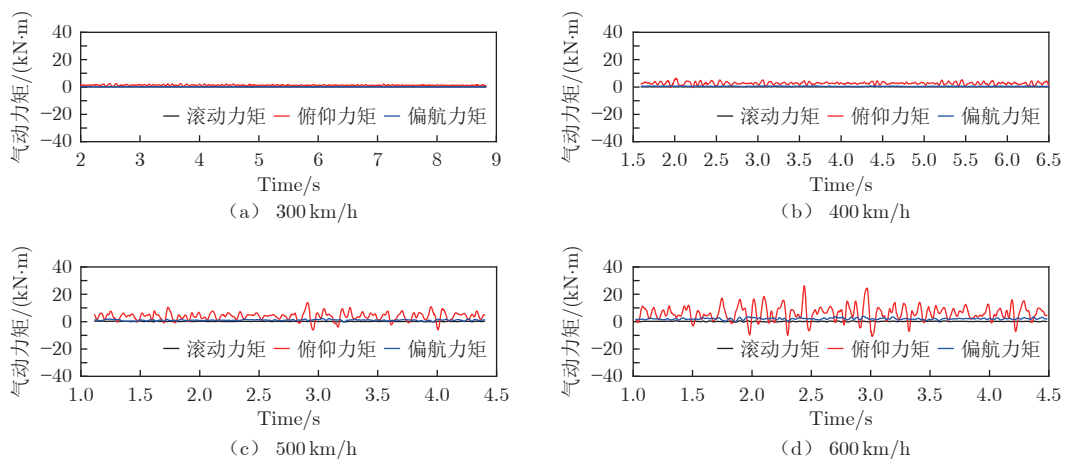


图 10 中车气动力矩时程曲线

Fig. 10 Histories of aerodynamic moments of the middle train

定常效应变得越来越强烈, 对车体的影响越来越大。中车两端分别受到头车和尾车的约束, 故其气动力和气动力矩的变化都很小。从图中还可以看

到, 在所有速度下, 尾车受到的阻力、升力、侧向力、俯仰力矩和偏航力矩的绝对值都大于头车和中车, 因此对于 3 编组磁浮列车而言, 尾车的运行稳定性

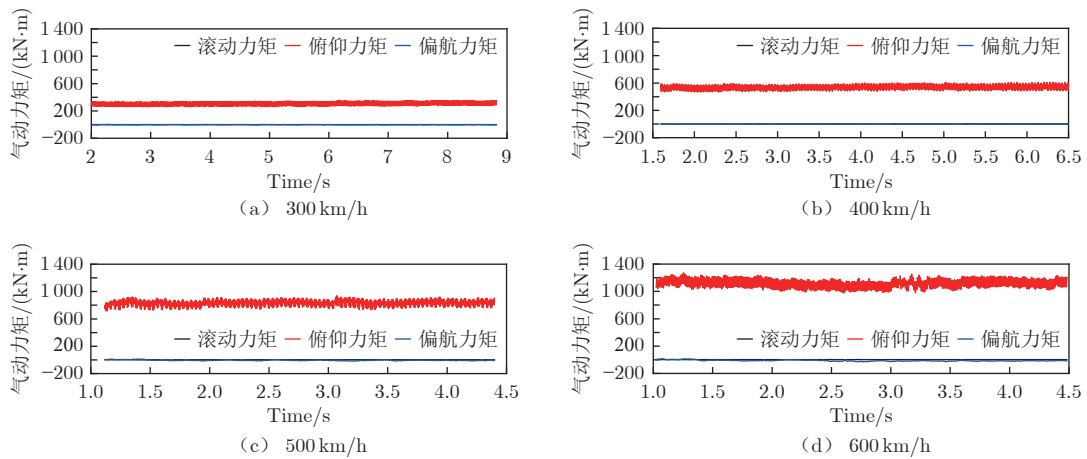


图 11 尾车气动力矩时程曲线

Fig. 11 Histories of aerodynamic moments of the rear train

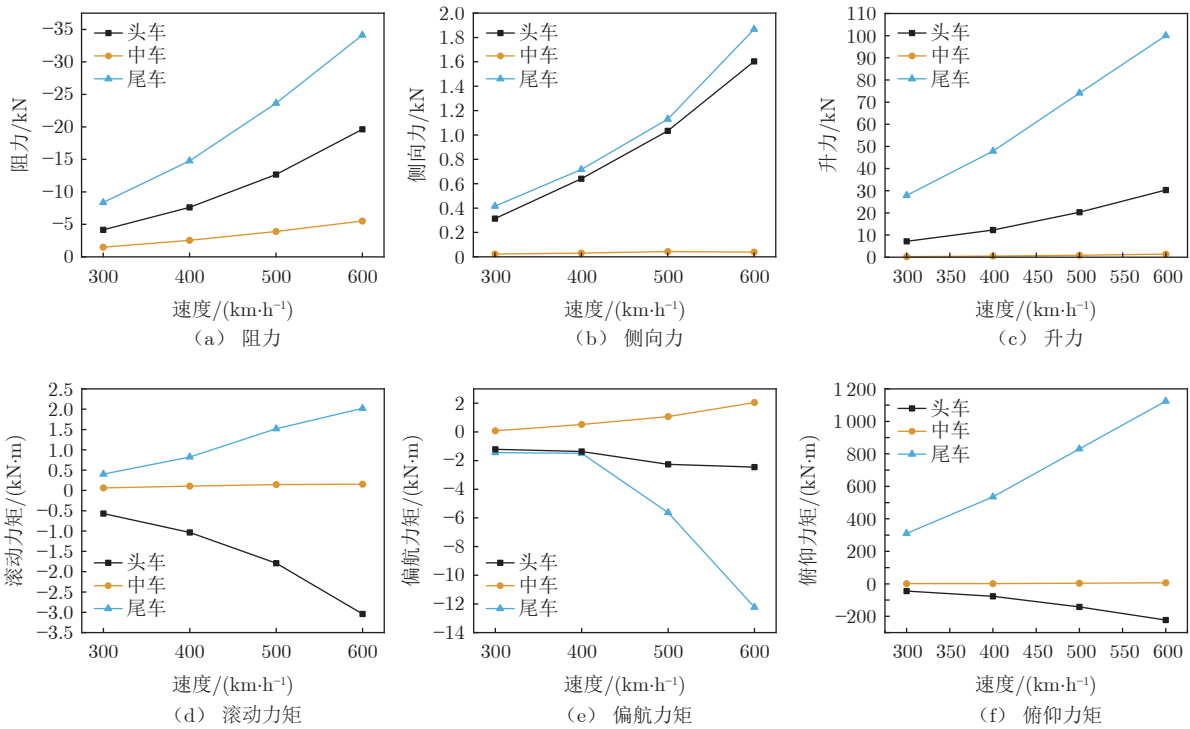


图 12 单车运行气动力和气动力矩的时均值

Fig. 12 Time-averaged values of the aerodynamic forces and moments of single maglev train

最差。表 2 记录了气动力和气动力矩的具体数值，可以看出，头车和尾车受到的俯仰力矩的绝对值远大于滚动力矩和偏航力矩，尾车受到的俯仰力矩也远超头车和中车。当列车速度为 600 km/h 时，头车受到的俯仰力矩约为滚动力矩的 70 倍、偏航力矩的 90 倍，而尾车受到的俯仰力矩约为滚动力矩的 550 倍、偏航力矩的 90 倍。因此，俯仰力矩是影响磁浮列车安全运行的最重要因素。

图 13 为单车以速度 500 km/h 运行时的涡量图， Q 值（流体速度梯度张量的第二不变量）取 50。

可以看到，一对流向涡起源于头车的下部，并从尾车的顶部脱落，其存在会使列车周围的气体流速和压力分布发生变化。由于该流向涡在沿车体发展过程中非定常效应变得越来越强烈，故其对尾车的气动力和气动力矩影响更大。

图 14 为单车以速度 500 km/h 运行时头车和尾车周围的压力云图。可以看到，头车的上下表面均存在一个较大的负压区，而尾车的上表面为负压区，下表面为正压区。头车上、下表面负压区对车体的作用力方向相反，二者相互抵消使得头车的升力和

表 2 单车运行气动力和气动力矩时均值
Table 2 Time-averaged values of single maglev train

速度/(km·h ⁻¹)	阻力/kN	侧向力/kN	升力/kN	滚动力矩/(kN·m)	俯仰力矩/(kN·m)	偏航力矩/(kN·m)
头车						
300	-4.16	0.31	7.15	-0.57	-44.88	-1.22
400	-7.61	0.64	12.24	-1.04	-76.88	-1.36
500	-12.66	1.03	20.29	-1.79	-141.97	-2.26
600	-19.62	1.60	30.33	-3.04	-222.58	-2.45
中车						
300	-1.48	0.02	0.23	0.06	1.30	0.08
400	-2.54	0.03	0.49	0.11	1.70	0.52
500	-3.90	0.04	0.88	0.14	3.92	1.07
600	-5.51	0.04	1.36	0.15	6.09	2.05
尾车						
300	-8.36	0.42	27.89	0.40	310.44	-1.45
400	-14.78	0.55	47.86	0.82	535.17	-0.93
500	-23.63	1.13	74.08	1.52	830.92	-5.63
600	-34.13	1.87	100.04	2.02	1124.26	-12.23

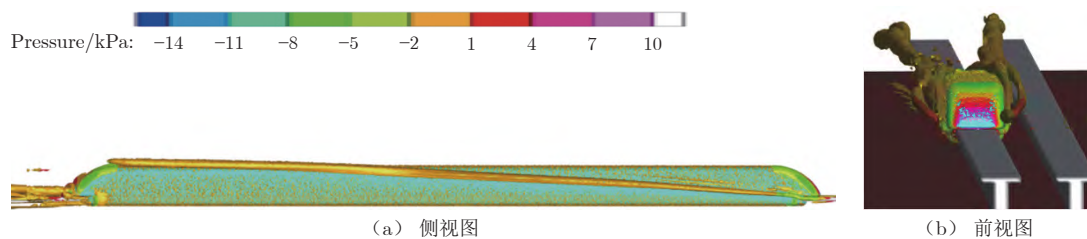


图 13 单车运行时列车周围涡量图
Fig. 13 Vortex distribution of single maglev train

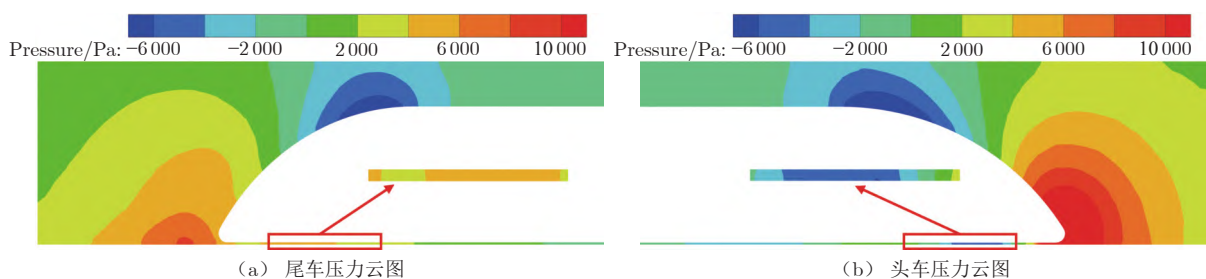


图 14 单车运行时列车周围压力分布图
Fig. 14 Pressure distribution around single maglev train

俯仰力矩较小；尾车下表面的正压区和上表面的负压区对车体作用力方向相同，二者相互叠加，导致尾车的升力和俯仰力矩较大。

采用同样的计算方法，可以得到列车交会场景下的气动力和气动力矩数据。可以预见：在交会前后，当列车之间的距离足够远时，所有曲线都类似于单车运行时的气动力和气动力矩曲线，而在列车交会过程中，与有效性验证时测点 P 的压力曲线类似，

气动力和气动力矩的曲线也会产生 2 个波动过程。

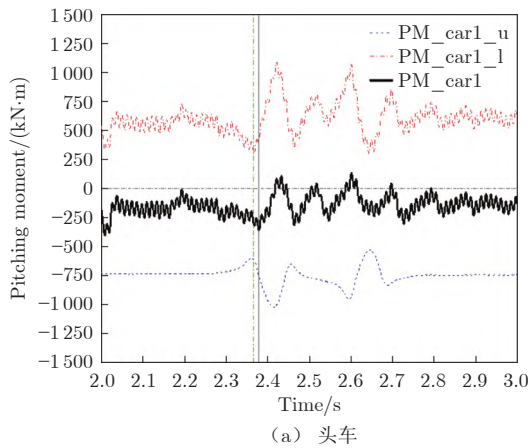
3 气动荷载振荡来源分析

如前所述，俯仰力矩在单车运行的过程中会出现明显的振荡，尤其是头车(car1)和尾车(car3)。为了找出气动荷载振荡的来源，将列车模型分为上下 2 部分(图 1)进行研究。每节列车上下部分的俯仰力矩如图 15 所示，其中黑色曲线(PM_car1)和红色曲

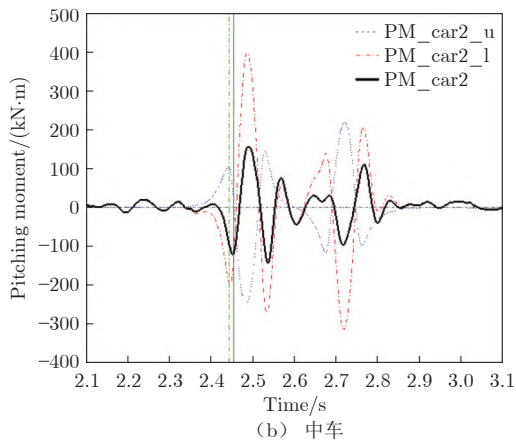
线(PM_car1_l)分别代表整节列车和下部结构的俯仰力矩。可以看到：二者振荡的频率和波形几乎相同，而代表上部结构俯仰力矩的蓝色曲线(PM_car1_u)相对平滑。这表明整节列车俯仰力矩的振荡主要是由下部结构引起的。此外，头车(car1)上部结构俯仰力矩的数值为负，下部结构俯仰力矩的数值为正，二者的相互叠加减小了头车的俯仰力矩。对尾车(car3)而言，上、下部结构俯仰力矩的数

值都为正，二者正向叠加增大了尾车的不稳定性。

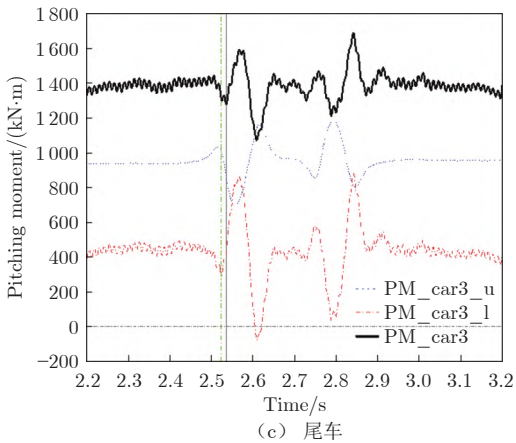
图 15 中的绿色竖线和灰色竖线分别标出了每节列车上部结构(或下部结构)和整节列车俯仰力矩第一个峰值所在的位置。可以看到，整节列车俯仰力矩峰值出现的位置总是晚于上部结构和下部结构，这是由于上、下部结构俯仰力矩的变化率不同，二者反向耦合导致的。对于偏航力矩，如图 16 所示，上、下 2 部分正向耦合，使得偏航力矩曲线的峰值总在同一条竖线上。



(a) 头车



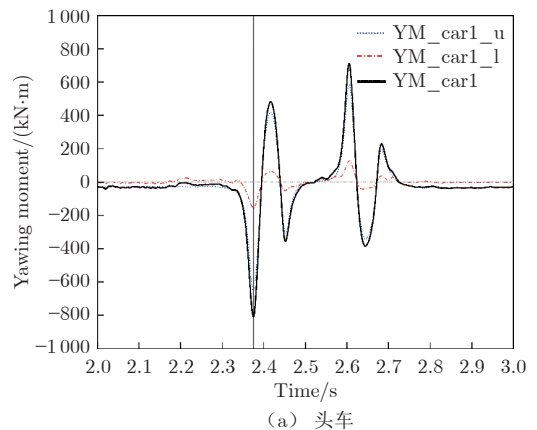
(b) 中车



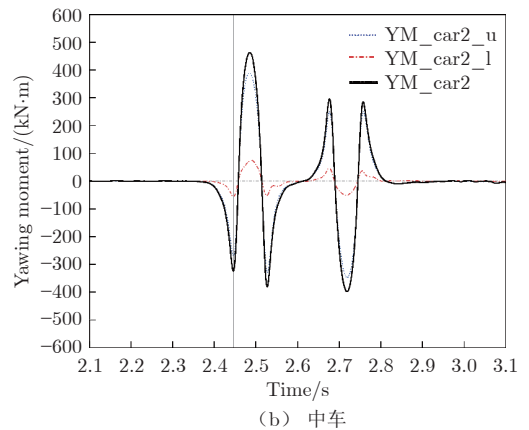
(c) 尾车

图 15 单节列车上部结构和下部结构俯仰力矩

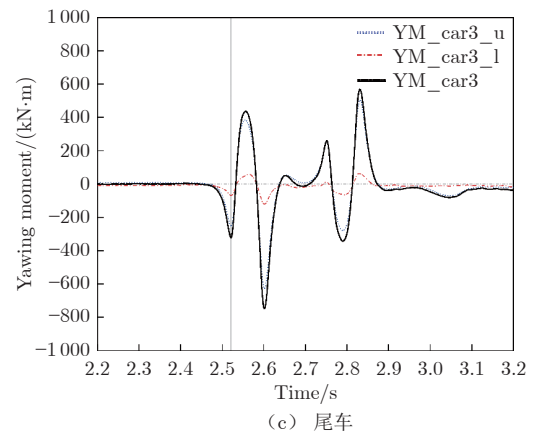
Fig. 15 Pitching moment of upper and lower part of each carriage



(a) 头车



(b) 中车



(c) 尾车

图 16 单节列车上部结构和下部结构偏航力矩

Fig. 16 Yawing moment of upper and lower part of each carriage

4 动力学特性分析

本文所用的磁浮列车动力学模型如图17所示。每节列车主要由以下部件组成：车体、4个悬浮架、8对可分离式摇臂、8对吊杆、4个牵引拉杆、8对悬浮磁铁、1对制动磁铁、6对导向磁铁、8对空气弹簧等。悬浮架由2个C形梁连接，且中间的纵梁可以发生较大的柔性变形，因此每个悬浮架可以简化成2个半悬浮架，由弹性单元连接。磁浮架上布置有

A型空气弹簧、B型空气弹簧、摇臂间的扭转元件、横向止挡弹簧，其参数如表3所示。其他构件则被视为刚体，其柔性变形被忽略。车辆的悬挂结构体现了各向刚度的独立性：二系悬挂的垂向、横向和纵向牵引分别由空气弹簧、吊杆与横向止挡弹簧、牵引装置独立提供；一系悬挂由悬浮磁铁和导向磁铁的支承橡胶件或关节结构独立提供。轨道与车辆通过电磁力进行耦合，悬浮磁铁磁力通过控制系统进行主动控制，从而实现车辆悬浮。

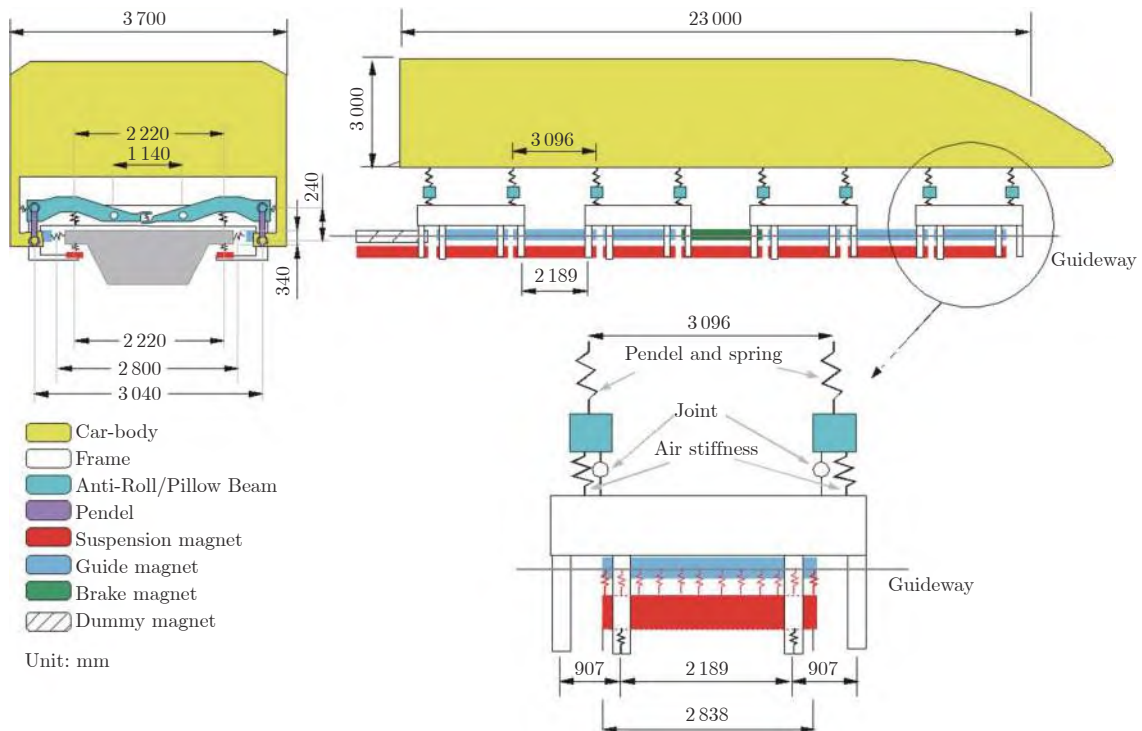


图17 磁浮列车动力学模型

Fig. 17 Dynamic model of maglev train

表3 磁浮架上部件的参数

Table 3 Parameters of components of the maglev frame

磁浮架上的部件	参数
A型空气弹簧	水平刚度: 1.1×10^5 N/m 横向刚度: 1.1×10^5 N/m 垂向刚度: 1.9×10^5 N/m
B型空气弹簧	水平刚度: 1.2×10^5 N/m 横向刚度: 1.2×10^5 N/m 垂向刚度: 1.9×10^5 N/m
摇臂间的扭转元件	横向刚度: 1.0×10^6 N/m 垂向刚度: 2.0×10^5 N/m 垂向阻尼: 5.0×10^5 N·s/m
横向止挡弹簧	横向刚度: 2.2×10^4 N/m

如前所述，计算力矩时的参考点是每节车厢的质心。如果仅在长度为1124 m的计算域内进行模拟，只能得到5 s内的气动荷载数据。为了更准确地分析磁浮列车单车运行和会车时的动力学特性，特别是列车交会后的振荡衰减特性，将单车运行和会车时的气动荷载数据拼接在一起。具体来说，是将单车明线运行的气动荷载数据拼接在会车的气动荷载数据之后，即可得到持续数十秒的气动荷载数据。将上述气动荷载施加到仿真模型每节车厢的质心上作为车体激励，开展3编组磁浮列车在气动荷载作用下的动力学计算。

4.1 计算方法验证

由于目前已开展的列车动力学实验研究较少，本文与文献[22]的结果进行对比，以验证动力学计

算方法的准确性。如图 18 所示, 本文利用 SIMPACK 软件建立了与文献 [22] 中相同的列车模型, 在相同动力学参数、轨道不平顺度及运行速度 (300 km/h) 下, 将计算得到的车体竖向位移与文献 [22] 中的结果进行了比较。可以看到, 本文得到的车体竖向位移曲线与文献 [22] 结果的频率完全一致, 仅峰值稍有差别, 其原因在于文献 [22] 中使用的是自编程序 (VTCDP), 而本文使用的是 SIMPACK 建立的列车动力学模型, 二者计算原理稍有差别。总体而言, 本文计算结果与文献 [22] 结果的差异在合理范围内, 计算准确性可信。

4.2 动力学计算结果分析

根据气动荷载特性分析的结果, 在列车运行尤其是两车交会过程中, 升力和俯仰力矩会发生剧烈振荡, 导致车体发生竖向振动和俯仰振动, 若振动幅值过大, 将会影响列车的舒适性和安全性。故在动力学计算部分, 本文先探究列车交会过程中的车体振动特性。

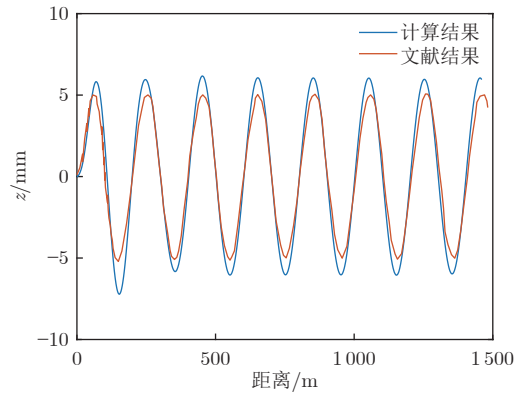


图 18 动力学方法验证
Fig. 18 Dynamic model verification

图 19 和 20 分别给出了列车以 300、400、500 和 600 km/h 的速度交会时车体的竖向振动和俯仰振动时程曲线。可以看到: 两车交会时, 各物理量的振荡幅值明显大于交会前, 且随着车速的增大, 振荡幅值也逐渐增大。当列车运行速度达到 600 km/h 时, 几乎不能保持悬浮稳定, 在气流的强烈冲击下, 交会时会发生失稳。

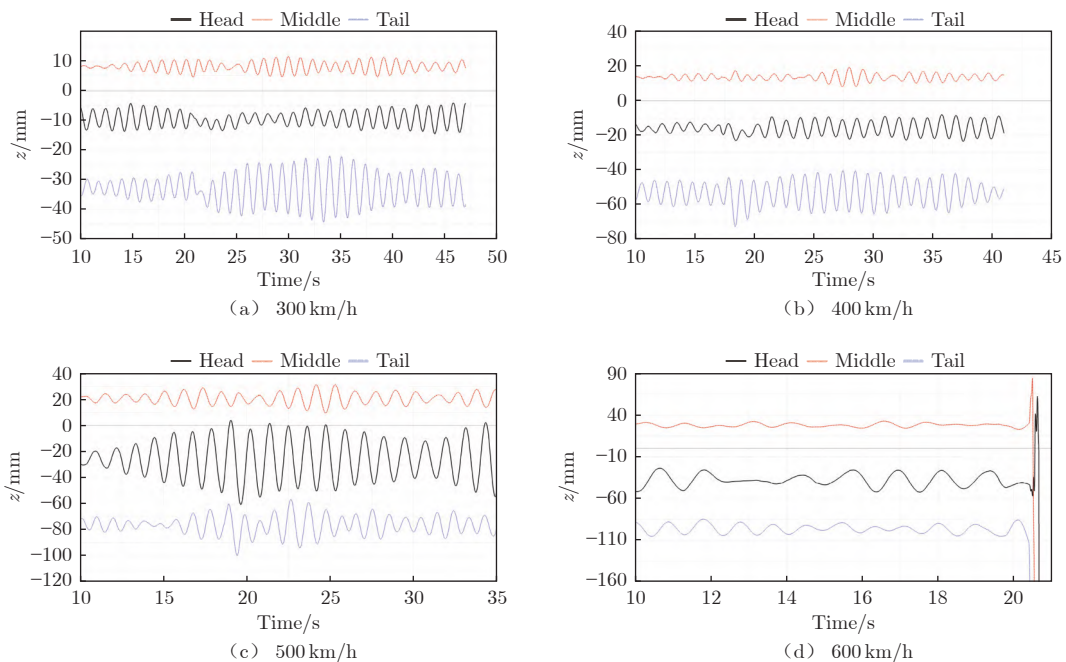


图 19 车体竖向振动曲线
Fig. 19 Vertical motion of each carriage

图 21 和 22 对比了不同速度下 3 节列车的最大竖向振动和俯仰振动幅值。可以看到: 随着速度的增大, 车体的振动也在加剧, 当单车以 600 km/h 的速度运行时, 车体的振动幅值已经达到了一个相当大的程度; 当两车以 600 km/h 的速度交会时, 由于车

体振动过于剧烈, 列车会发生失稳。此外, 在同一速度下, 尾车的竖向振动和俯仰振动最为剧烈, 头车次之, 中车最小。出现这种现象的原因主要在于气流在沿着列车发展过程中, 非定常效应变得越来越强烈, 故尾车受到的扰动最大, 而中车两端受到头车和

尾车约束, 振动减小。这与气动荷载特性的分析结果是对应的。

列车车体的振动会引起悬浮磁铁间隙发生波动。TR08型磁浮列车额定悬浮磁铁间隙为 10 mm,

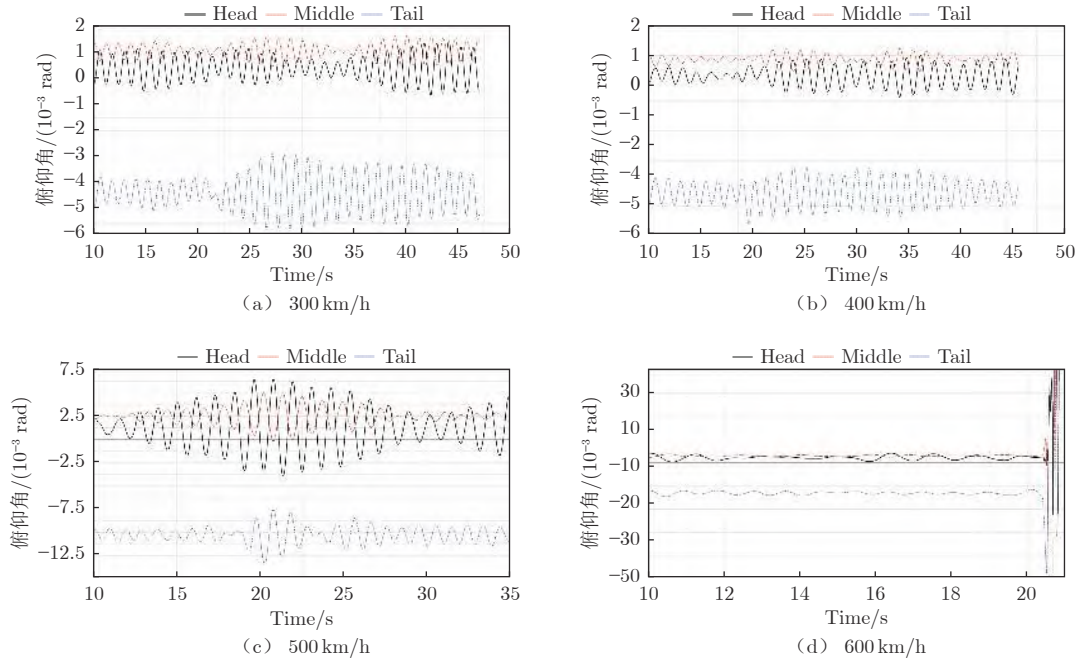


图 20 车体俯仰振动曲线

Fig. 20 Pitching motion of each carriage

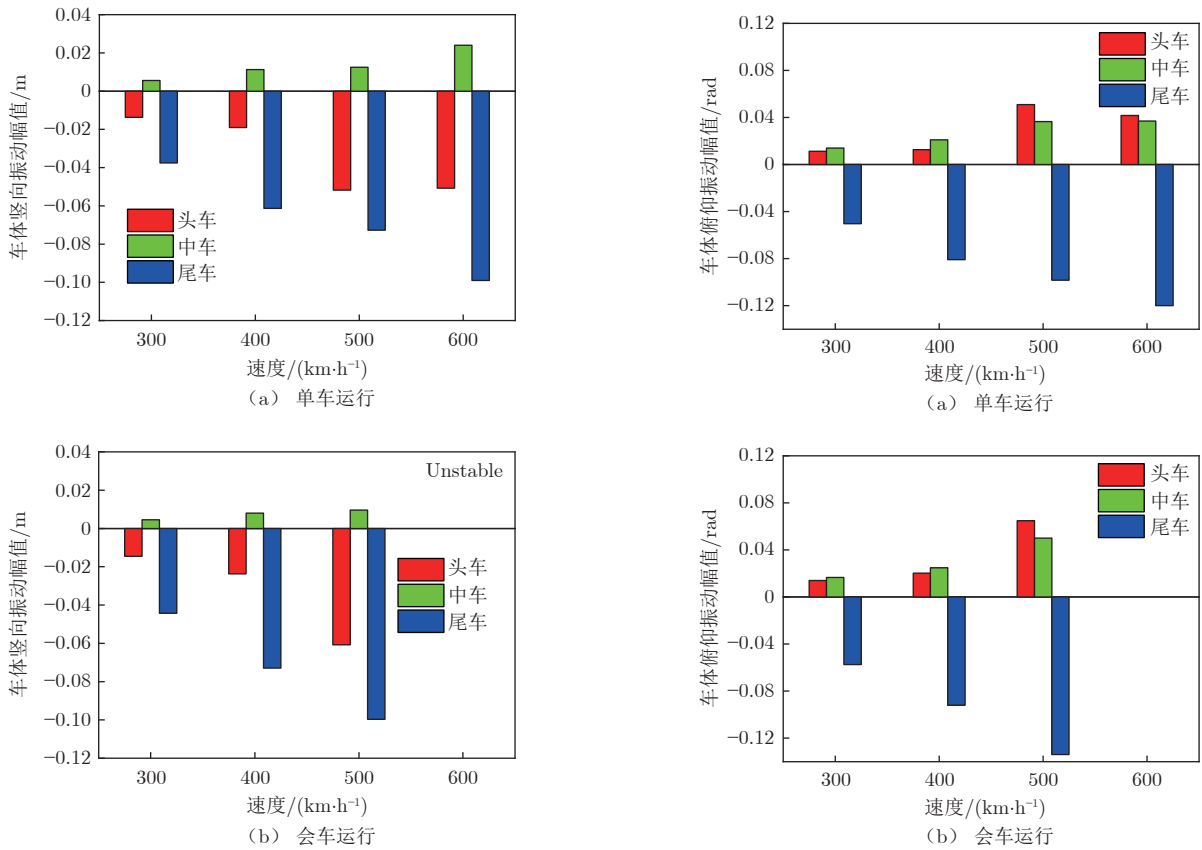


图 21 每节列车最大竖向振动幅值

Fig. 21 Maximum vertical motion amplitude of each carriage

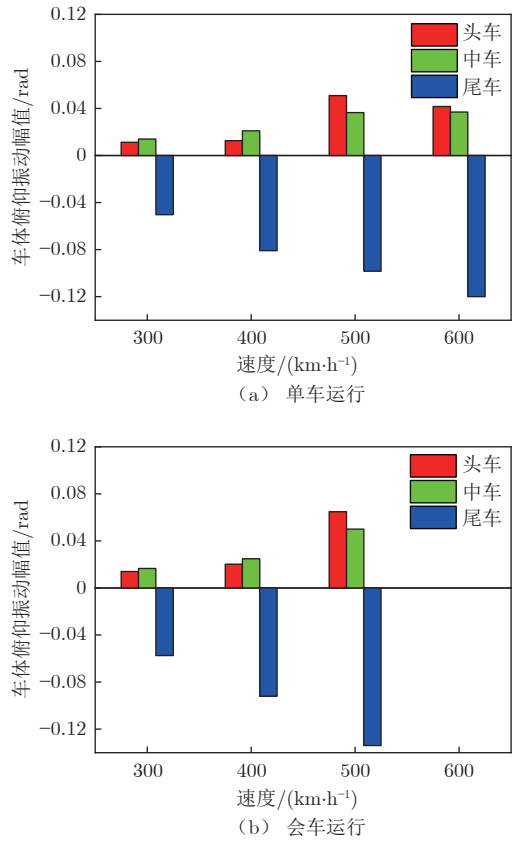


图 22 每节列车最大俯仰振动幅值

Fig. 22 Maximum pitching motion amplitude of each carriage

列车运行时，若悬浮磁铁间隙波动幅值较大，会影响列车舒适性和安全性。列车模型悬浮磁铁的分布如图 23 所示。为了比较不同位置悬浮磁铁间隙的波动情况，图 24 和 25 分别给出了列车明线单车运行和会车场景下不同位置悬浮磁铁间隙波动的幅值。正常情况下，悬浮磁铁间隙波动不超过 3 mm 是安全的。从图中可以看到：当车速达到 600 km/h 时，即使在单车运行的情况下，T7(字母 T、M、H 分别为尾车、中车和头车的代号，数字则代表该节列车上悬浮磁铁的编号)位置的悬浮磁铁间隙波动已经超过 4 mm，左侧间隙最大可以达到 7.5 mm。也就是说，单节 TR08 型列车以 600 km/h 速度运行时，电磁铁悬浮架不能保证安全，可能会出现脱轨等危险情况。从图

中还可以看到：由于头车和尾车车体振动幅值大于中车，其悬浮磁铁间隙波动幅值也较大，且头车前端和尾车末端的悬浮磁铁间隙波动幅值远大于其他位置，这主要是由于头车俯仰力矩(负)和尾车俯仰力矩(正)符号相反，这种气动荷载分布使头车始终保持头端向上，尾车始终保持尾端向下，故列车两端悬浮磁铁间隙波动幅值较大。当列车以 600 km/h 速度交会时，悬浮磁铁间隙波动幅值远超 10 mm，模型失效，列车发生失稳。不仅如此，即使在 500 km/h 的情况下，T7 右侧电磁铁的悬浮磁铁间隙波动也达到了 2.7 mm(图 25(b))，接近安全极限。与单车运行时的情况类似，列车交会时悬浮磁铁间隙波动幅值分布也是两端较大。

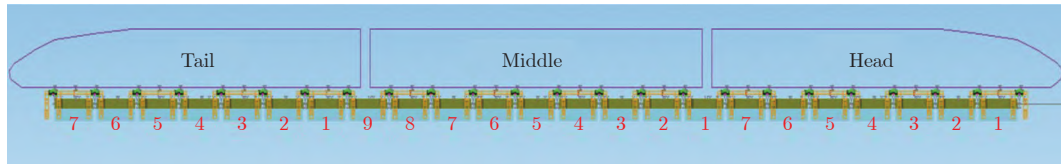
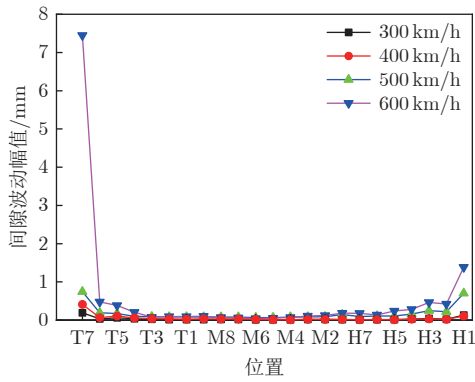
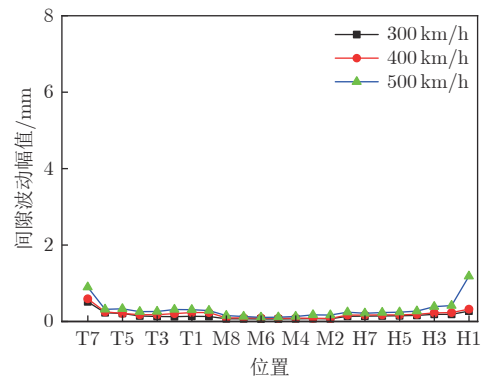


图 23 悬浮磁铁分布

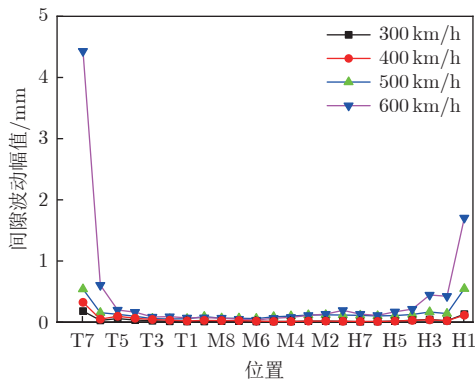
Fig. 23 Distribution of suspension electromagnets



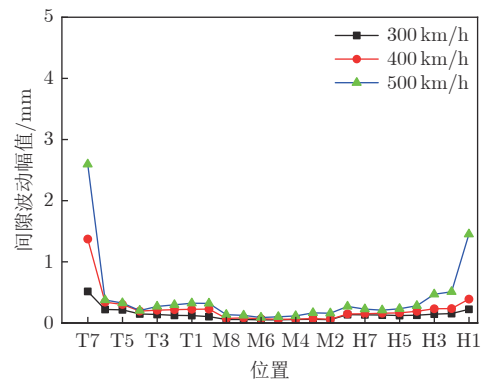
(a) 左侧悬浮磁铁



(a) 左侧悬浮磁铁



(b) 右侧悬浮磁铁



(b) 右侧悬浮磁铁

图 24 单车运行时悬浮磁铁间隙波动幅值

Fig. 24 Suspension magnet gap fluctuation amplitude(train running)

图 25 会车时悬浮磁铁间隙波动幅值

Fig. 25 Suspension magnet gap fluctuation amplitude(train meeting)

5 结 论

本文研究了气动荷载作用下磁浮列车的动力学特性。采用滑移网格法对速度为 300~600 km/h 的 TR08 型 3 编组磁浮列车周围的流场进行了非定常数值模拟,分析得到了单车运行和会车时的气动力和气动力矩的时程曲线,并将每节列车分成上、下结构 2 部分,给出了单车运行过程中上、下部结构俯仰力矩和偏航力矩的时程曲线,对整车俯仰力矩的迟滞现象进行了分析。在此基础上,建立了 3 编组列车的动力学与控制联合仿真模型,通过在模型上施加单车运行和会车的气动力和气动力矩,计算得到了每节列车的竖向和俯仰振动幅值及悬浮磁铁间隙波动。通过分析,得到如下结论:

1) 单车运行时,磁浮列车受到的气动荷载随速度的增大而增大,且总体呈现尾车 > 头车 > 中车的规律。俯仰力矩的数值远大于滚动力矩和偏航力矩,在气动荷载中占主导地位,是影响列车安全运行的最重要因素。

2) 单节列车俯仰力矩峰值出现的位置总是晚于上部结构或下部结构,这是由于上部结构和下部结构的俯仰力矩符号相反、变化率不同,二者反向耦合导致的。对于偏航力矩,上、下部结构的变化率相同,并不会出现整节列车力矩峰值迟滞的现象。

3) 列车交会时,车体和悬浮磁铁间隙的振动幅值远大于单车运行情况,且随着列车速度的增大而增大。当 TR08 型列车速度达到 600 km/h 时,由于气流强烈的冲击效应,列车的竖向运动和俯仰运动的振动幅值、悬浮磁铁间隙将超过安全极限。

参考文献:

- [1] 丁叁叁,姚拴宝,陈大伟. 高速磁浮列车气动升力特性[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(8): 228-234.
DING S S, YAO S B, CHEN D W. Aerodynamic lift force of high-speed maglev train[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(8): 228-234.
doi: 10.3901/JME.2020.08.228
- [2] SICLARI M, ENDE R, CARPENTER G. The application of Navier-Stokes computations to the design of high-speed, low-drag magnetically levitated (Maglev) vehicle shapes [C]//Proc of the 13th Applied Aerodynamics Conference. 1995: 1908.
doi: 10.2514/6.1995-1908
- [3] TYLL J, LIU D, SCHETZ J, et al. Experimental studies of maglev aerodynamics[C]//Proc of the 13th Applied Aerodynamics Conference. 1995: 1917.
doi: 10.2514/6.1995-1917
- [4] WELLS J, BRITCHER C. An aerodynamic study of an urban maglev vehicle[C]//Proc of the 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2010: 1419.
doi: 10.2514/6.2010-1419
- [5] 李人宪,刘应清,翟婉明. 高速磁悬浮列车纵向及垂向气动力数值分析[J]. *中国铁道科学*, 2004, 25(1): 8-12.
LI R X, LIU Y Q, ZHAI W M. Numerical analysis of aerodynamic force in longitudinal and vertical direction for high-speed maglev train[J]. *China Railway Science*, 2004, 25(1): 8-12.
doi: 10.3321/j.issn:1001-4632.2004.01.002
- [6] 毕海权,雷波,张卫华. TR型磁浮列车气动力特性数值计算研究[J]. *铁道学报*, 2004, 26(4): 51-54.
BI H Q, LEI B, ZHANG W H. Research on numerical calculation for aerodynamic characteristics of the TR maglev train[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2004, 26(4): 51-54.
doi: 10.3321/j.issn:1001-8360.2004.04.011
- [7] 刘堂红,田红旗,王承尧. 不同磁浮列车外形的气动性能比较[J]. *国防科技大学学报*, 2006, 28(3): 94-98.
LIU T H, TIAN H Q, WANG C Y. Aerodynamic performance comparison of several kind of nose shapes of maglev train[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, 28(3): 94-98.
doi: 10.3969/j.issn.1001-2486.2006.03.020
- [8] HUANG S, LI Z W, YANG M Z. Aerodynamics of high-speed maglev trains passing each other in open air[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 188: 151-160.
doi: 10.1016/j.jweia.2019.02.025
- [9] YANG M Z, ZHONG S, ZHANG L, et al. 600 km/h moving model rig for high-speed train aerodynamics[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2022, 227: 105063.
doi: 10.1016/j.jweia.2022.105063
- [10] 陈敬旭. 明线上高速磁浮列车交会时压力波与气动性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
CHEN J X. Study on crossing air pressure pulse and aerodynamic performance of high-speed Maglev trains meeting in the open air[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [11] GAO D G, NI F, LIN G B, et al. Aerodynamic analysis of pressure wave of high-speed maglev vehicle crossing: modeling and calculation[J]. *Energies*, 2019, 12(19): 3770.
doi: 10.3390/en12193770
- [12] 杨永刚,杜云超,梅元贵. 单列高速列车通过隧道空气阻力特性数值模拟研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2018, 15(11): 2755-2763.
YANG Y G, DU Y C, MEI Y G. Numerical simulation of aerodynamic drag of single high-speed train passing through a tunnel[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018, 15(11): 2755-2763.
doi: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2018.11.005
- [13] ZHOU P, LI T, ZHAO C F, et al. Numerical study on the flow field characteristics of the new high-speed maglev train in open air[J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2020, 21(5): 366-381.
doi: 10.1631/jzus.a1900412

- [14] 罗宇豪, 池茂儒, 吴兴文, 等. 新型中低速磁浮车辆振动传递特性研究[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(20): 8848–8855.
LUO Y H, CHI M R, WU X W, et al. Vibration transmission characteristics of new medium-low speed magnetic levitation vehicle[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(20): 8848–8855.
doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2022.20.035
- [15] 陆海英, 韩霄翰, 李忠继, 等. 中低速磁浮系统起浮阶段的振动特性分析[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(3): 318–324.
LU H Y, HAN X H, LI Z J, et al. Analysis of vibration characteristics of low-medium speed maglev levitation systems in lifting stages[J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(3): 318–324.
doi: 10.3969/j.issn.1004-132X.2019.03.011
- [16] 刘耀宗, 邓文熙, 龚朴. 低速磁浮列车单悬浮架机电控制建模及动力学特性研究[J]. *铁道学报*, 2014, 36(9): 39–43.
LIU Y Z, DENG W X, GONG P. Dynamics-control modeling and analysis for bogie of low-speed maglev train[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(9): 39–43.
doi: 10.3969/j.issn.1001-8360.2014.09.08
- [17] 赵春霞. EMS型高速磁浮列车导向动力学研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
ZHAO C X. Research on guidance dynamics of EMS high-speed maglev train[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [18] 舒瑶, 蒋忠诚, 佟来生, 等. 横风荷载下电磁悬浮EMS型磁浮车辆动态响应特性分析[J]. *城市轨道交通研究*, 2021, 24(12): 38–42.
SHU Y, JIANG Z C, TONG L S, et al. Dynamic response characteristics analysis of EMS maglev vehicle under cross wind loads[J]. *Urban Mass Transit*, 2021, 24(12): 38–42.
doi: 10.16037/j.1007-869x.2021.12.008
- [19] WU H, ZENG X H, GAO D G. Periodic response and stability of a maglev system with delayed feedback control under aerodynamic lift[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2021, 21(03): 2150040.
doi: 10.1142/S0219455421500401
- [20] WU H, ZENG X H, YU Y. Motion stability of high-speed maglev systems in consideration of aerodynamic effects: a study of a single magnetic suspension system[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2017, 33(6): 1084–1094.
doi: 10.1007/s10409-017-0698-z
- [21] LI M S, LEI B, LIN G B, et al. Field measurement of passing pressure and train induced airflow speed on high speed maglev vehicles[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2006, 24(2): 209–212.
doi: 10.3969/j.issn.0258-1825.2006.02.013
- [22] 李田, 张继业, 张卫华. 横风下车辆-轨道耦合动力学性能[J]. *交通运输工程学报*, 2011, 11(5): 55–60.
LI T, ZHANG J Y, ZHANG W H. Coupling dynamics performance of vehicle-track under cross wind[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2011, 11(5): 55–60.
doi: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2011.05.009

作者简介:



南凯威(1998—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生。研究方向: 高速列车空气动力学。通信地址: 北京市海淀区北四环西路 15 号中国科学院力学研究所 2 号楼(100190)。
E-mail: nankaiwei21@mails.ucas.ac.cn

(编辑: 秦虹)