

真空管道磁悬浮列车流固耦合特性研究

寇杰 高兴龙 李松 符澄*

(中国空气动力研究与发展中心 设备设计与测试技术研究所 绵阳 621000)

The Fluid-Solid Coupling Characteristics of Vacuum Pipeline Maglev Train

KOU Jie, GAO Xinglong, LI Song, FU Cheng*

(Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract The interaction between the motion of a vacuum pipeline maglev train and the flow field inside the pipeline results in a highly unstable flow environment. At the same time, the characteristics of the train suspension operation will cause serious fluid-solid coupling effects between the train and the flow field. In this issue, a fluid-solid coupling dynamics theory was proposed. A numerical calculation model for the fluid-solid coupling was established to achieve real-time online interaction data of trains. The fluid-solid coupling characteristics of the vacuum pipeline maglev train were analyzed. Research results show that the flow field at the rear of the train is relatively complex, with multiple oblique shock waves and reflected waves. As the train runs relatively stably, the wave system at the top and the head of the train is relatively simpler. But it will undergo significant changes with the train's operation. The aerodynamic load on the train exhibits low-frequency periodic changes. A decrease in suspension stiffness leads to an increase in the amplitude of the aerodynamic load on the train and a decrease in the frequency. Under the suspension stiffness of 30 kN, the displacement and rotation amplitude of the train can reach 270 mm and 14 mrad. The aerodynamic load on the train shows an oscillating amplitude and an increasing trend over time. It will affect the safety of the train. The above research can provide theoretical guidance and analytical method reference for the study of vacuum tube maglev trains.

Keywords Vacuum pipeline, Maglev train, Fluid-solid coupling, Aerodynamic force, Aerodynamic characteristic

摘要 真空管道磁悬浮列车运动与管道内流场相互作用,导致列车流场环境具有高度的非稳定性,同时列车悬浮运行的特性将使列车与管道内流场间存在严重的流固耦合效应。针对这一问题,提出了真空管道磁悬浮列车流固耦合动力学理论,并建立了可以实现列车在线实时交互数据的流固耦合数值计算模型,分析真空管道磁悬浮列车的车辆流固耦合特性。研究发现,列车悬浮运行列车尾部流场较为复杂,存在多道斜激波和反射波,随着列车的运行相对较为稳定,而列车顶部和头部的波系相对更加简单,但会随着列车运行发生明显的变化。列车受到的气动载荷呈低频周期性变化,悬浮刚度的减小会导致列车受到的气动载荷幅值增加,频率下降。在 30 kN 悬浮刚度下,列车的位移和转动幅值可以达到 270 mm 和 14 mrad,并且随着时间推移,列车受到的气动载荷呈现振荡幅值还有增大的态势,影响列车运行安全。上述研究可以为真空管道磁悬浮列车的研究提供理论指导和分析方法参考。

关键词 真空管道 磁悬浮列车 流固耦合 气动载荷 气动特性

中图分类号:U171

文献标识码:A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202402003

真空管道磁悬浮列车作为一种新型超高速交通工具,在一定真空度的密闭管道中采用磁悬浮技术,可以实现列车不存在传统轮轨接触的超高速悬

浮运行^[1]。超高速的运行速度、部分真空环境叠加上管道壁面效应使列车运行具有气动特性,也为轨道交通列车的气动力学研究带来的新的挑战。针

收稿日期:2024-02-06

基金项目:中国空气动力研究与发展中心设备设计与测试技术研究所青年自主创新科学基金项目

* 联系人: E-mail: 50653302@qq.com

对真空管道磁悬浮列车的空气动力学问题,国外研究学者主要重点研究了真空管道磁悬浮列车运行中的气动阻力与环境参数、车辆运行参数之间的关系^[2-5]。在研究这一重点气动问题的同时,KIM等^[6-7]发现了真空管道磁悬浮列车的尾部存在激波现象。

真空管道磁悬浮列车产生的压力波具有复杂的产生机制和传播机理,Gillani等^[8-14]国内外研究人员研究了列车运行速度、管内压力、列车长度、阻塞率及管内温度与管道内复杂的压力波系之间的关系,将该问题作为一个稳态气动问题进行研究,而通过进一步的研究中可以发现,实际列车运行过程中,由于列车的运动、位置速度和管道内的波系结构均会随着时间发生变化,不同时刻下管道内的压力波将存在差异,因此真空管道列车的气动问题实际上应该是一个非稳态问题^[15]。在近年来的一些研究中,Kim等^[16-17]将该问题作为非稳态问题开展研究,并重点关注了列车车体后方的波系随时间的变化特性。Zhou^[18-19]同时也采用非稳态的思路开展了列车在高速运行过程中周围的激波簇结构的变化特性的研究。相关的研究均体现出列车周围的气动环境呈现非稳态,并且列车的气动特性在非稳态气动环境中将会发生变化。针对低真空管道列车的气动特性的研究,目前国内外研究人员已就相对复杂的工况,包括列车短距离内加减速运行、列车交会运行过程中列车的气动特性的变化开展了大量研究^[20-23]。但是目前的研究仍然仅关注于列车的气动阻力与加减速速度、列车交会方式、轨道形式等之间的关系,仍未就列车受到的其他方向的气动力及气动力矩进行研究^[24-25]。然而,真空管道内非稳定流场环境与悬浮运行的列车相互作用,气动载荷呈现非稳定值,且气动力和气动力矩同时存在,流固耦合效应凸显。寇杰等^[26]通过调研总结国内外研究成果发现,目前尚未有研究人员将低真空管道列车作为变化姿态的运动物体,开展其在非定常气动环境内的流固耦合研究。因此可以看出真空管道磁悬浮列车的列车与管道内流场间存在严重的流固耦合效应,尚未有相关研究结果出现,需要对针对这一问题开展深入研究。本文主要研究真空管道磁悬浮列车的流固耦合效应,提出真空管道磁悬浮列车的流固耦合动力学理论和分析方法,并建立了数值计算模型,分析真空管道磁悬浮列车的车辆流固耦合特性,得到非定常气动载荷下的列车

运行气动特性和运动特性。

1 真空管道磁悬浮列车流固耦合动力学理论

真空管道磁悬浮列车流固耦合效应研究需要在真空管道磁悬浮列车空气动力学研究中进一步融合考虑列车自身系统动力学响应对管道内流场产生的影响。如图1所示,在真空管道磁悬浮列车的空气动力学分析中引入了列车动力学参数,设置列车作为具有六自由度的运动物体,列车受到的气动在和作为车辆动力学分析的载荷参数,同时利用动力学理论分析列车姿态的变化。为实现两种力学理论的融合,利用欧拉描述对流体进行分析,拉格朗日描述对固体运动力学进行分析,将两种描述相结合形成任意拉格朗日-欧拉(Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)方法,可以实现了流固耦合分析中需要的空气动力学和运动力学分析的统一^[27]。利用该方法将列车动力学响应下的列车姿态变化融入流场分析理论中,形成了空气动力学-车辆动力学的大系统动力学研究理论。

首先对于流体分析,流体的质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{u}_f) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho_f \mathbf{u}_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{u}_f \mathbf{u}_f - \boldsymbol{\tau}_f) = \mathbf{f}_f \quad (2)$$

式中 ρ_f 为流体密度、 t 为时间、 $\mathbf{f}_f$ 为流体体积力矢量。 $\mathbf{u}_f$ 为流体速度矢量、 $\boldsymbol{\tau}_f$ 为剪切力张量。其中 $\boldsymbol{\tau}_f$ 可表示为:

$$\boldsymbol{\tau}_f = 2\mu \mathbf{e} - \left(p + \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{u}_f \right) \mathbf{I} \quad (3)$$

式中, p 为流体压力, μ 为动力粘度, $\mathbf{e}$ 为速度应力张量, $\mathbf{e}$ 可表示为:

$$\mathbf{e} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u}_f + \nabla \mathbf{u}_f^T) \quad (4)$$

由牛顿第二定律导出固体部分的守恒方程:

$$\rho_s \dot{\mathbf{u}}_s = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_s + \mathbf{f}_s \quad (5)$$

其中, ρ_s 为固体密度、 $\boldsymbol{\sigma}_s$ 为柯西应力张量、 $\mathbf{f}_s$ 为固体体积矢量、 $\mathbf{u}_s$ 为固体域当地速度矢量、 T 为温度。

在列车和空气相互作用过程中,满足交界面上的流体和固体的速度守恒,因此满足:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_f^i = \mathbf{u}_s^i \\ \boldsymbol{\sigma}_f^i \cdot \mathbf{n} = \boldsymbol{\sigma}_s^i \cdot \mathbf{n} \end{cases} \quad (6)$$

$\mathbf{u}_f^i$ 为流体在在耦合交界面上的速度, $\mathbf{u}_s^i$ 为固体

在耦合交界面上的速度, σ_f^i 和 σ_s^i 分别表示流体和固体在耦合交界面上的应力, $\mathbf{n}$ 为相互作用的交界面上的外法向量^[27]。

在满足交界面 i 上速度守恒的同时, 交界面上的应力也同时需要满足守恒定律, 实现应力平衡。但是交界面上的流体和固体节点并非完全重合, 因此需要将流体的应力映射到固体的节点上, 从而实现两种计算域的应力有效传递, 计算出固体节点力 $\mathbf{F}_s^i$:

$$\mathbf{F}_s^i = \int (\mathbf{H}^s)^T \sigma_f^i ds \quad (7)$$

$(\mathbf{H}^s)^T$ 是流体到固体域的应力传递插值矩阵。

在传递节点应力的同时, 需要利用固体的节点位移和节点位移传递插值矩阵计算出流体域的节点位移 $\mathbf{X}_f^i$:

$$\mathbf{X}_f^i = \int (\mathbf{H}^f)^T \mathbf{x}_s^i ds \quad (8)$$

$(\mathbf{H}^f)^T$ 是固体到流体域的位移传递插值矩阵, $\mathbf{x}_s^i$ 为交界面上的固体节点位移。

对于流体力学和固体力学分别采用欧拉和拉格朗日进行描述, 本构方程为:

欧拉描述——流体流动方程:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}_s}{\partial t} + \rho (\mathbf{u}_s \cdot \nabla) \mathbf{u}_s = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u}_s + (\nabla \mathbf{u}_s)^T)] + \mathbf{F} \quad (9)$$

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u}_f = 0 \quad (10)$$

式中, ρ 为流体密度, t 为时间, $\mathbf{u}_f$ 为流体速度矢量, μ 为流体动力黏度, T 为温度, $\mathbf{F}$ 为外力, p 为压力, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

拉格朗日描述——运动力学方程:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}_f}{\partial t^2} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{F} \mathbf{v}_s \quad (11)$$

式中, $\mathbf{v}_s$ 为固体速度向量, $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力。

需要基于流体运动公式(9)和(10)计算得到的流场的流速 $\mathbf{u}_f$, 进一步计算得到运动物体所受到的流体产生的载荷 $\mathbf{f}$:

$$\mathbf{f} = \mathbf{n} \cdot \left\{ -p\mathbf{I} + \left[\mu(\nabla \mathbf{u}_f + (\nabla \mathbf{u}_f)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u}_f)\mathbf{I} \right] \right\} \quad (12)$$

式中, p 为压力, μ 为流体粘度, T 为温度, $\mathbf{I}$ 为特征矩阵。

本文中运动物体受到的流体产生的载荷为气动载荷。利用气动载荷 $\mathbf{f}$ 及网格单元的空间框架和材料框架的缩放因子 dv 和 dV , 可以进一步计算出运动物体受到的气动力矩 $\mathbf{F}_f$:

$$\mathbf{F}_f = \mathbf{f} \cdot \frac{dv}{dV} \quad (13)$$

同时耦合效应需考虑物体刚性运动的速度 $\mathbf{u}_s^r$:

$$\mathbf{u}_s^r = \frac{\partial \mathbf{X}_s^r}{\partial t} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{X}_s^r$ 为运动物体的刚体位移矩阵。运动物体的刚体运动位移和变形量共同决定了流固耦合交界面上的固体节点位移 $\mathbf{x}_s^i$ 。

主要运动力学方程为:

$$\mathbf{M}_s \frac{\partial^2 \mathbf{X}_s^r}{\partial t^2} + \mathbf{C}_s \frac{\partial \mathbf{X}_s^r}{\partial t} + \mathbf{K}_s \mathbf{X}_s^r = \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_a \quad (15)$$

其中, $\mathbf{M}_s$ 为运动物体的质量矩阵, $\mathbf{C}_s$ 为运动物体的阻尼矩阵, $\mathbf{K}_s$ 为运动物体的刚度矩阵, $\mathbf{F}_a$ 为气动载荷以外的其他外界载荷。

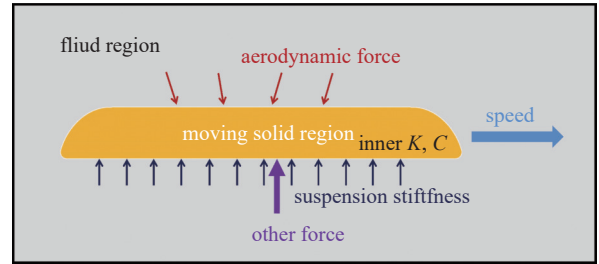


图1 列车气动与运动力学耦合分析示意图

Fig. 1 The aerodynamic-motion coupling analysis of train schematic diagram

2 真空管道磁悬浮列车流固耦合动力学模型

基于上述真空管道磁悬浮列车流固耦合理论, 利用 COMSOL 多场分析软件的流体力学分析模块、多体动力学分析模块以及流固耦合分析器, 构建出真空管道磁悬浮列车空气动力学-车辆动力学的联合仿真计算环境, 实现了列车空气动力学分析和多体动力学分析实时联系, 形成兼顾计算精度和计算效率的真空管道环境下列车流固耦合动力学分析方法。建立了考虑空气动力学-车辆动力学耦合效应的真空管道磁悬浮列车实时在线流固耦合数值计算模型。

真空管道磁悬浮列车分析模型采用二维模型, 分析中采用单节车的结构, 管道直径 6 m, 列车高度 0.9 m, 阻塞比为 0.3, 车体与管道地面的间隙为 1 m。基于低真空管道仿真模型结构, 设置列车为运动固体域, 设置低真空管道内其余部分为流体域, 建立低真空管道仿真模型。为实现 340 m/s 的运行速度, 流场压力设置为 0.1 个大气压对应的密度, 湍流模

型设置为 RANs 的 $k-\omega$ 模型, 温度为 293.15 K。

网格划分时, 对运动域附近的网格设置为动网格, 跟随运动域以相同速度运行, 并将这部分网格进行细化。在远离运动域的部分, 采用较粗的网格进行划分, 降低整体网格数量, 网格划分后如图 2 所示。其中在列车表面的网格需要相对较小, 采用了最小 10 mm 的网格尺寸, 在远离列车位置的网格, 则采用渐变式网格, 距离列车位置越远网格尺寸越大, 网格最大为 1000 mm。此外为了准确模拟列车表面附面层效果, 对列车周围流场区域设置了边界层网格, 总共设置了 8 层边界层, 总网格数为 112526 个。

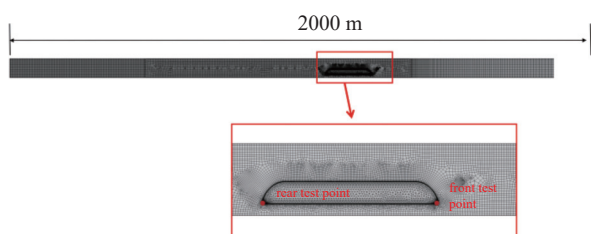


图2 列车网格分布

Fig. 2 The grid distribution of train

建立用于为列车提供悬浮力的悬浮力模拟单元。分析时采用了弹簧基座模型对悬浮力进行模拟。弹簧基座模型是一种可以定义与运动物体和固定地面之间相互作用的力元模型, 该模型可以定义各向刚度和阻尼, 同时可以定义该力元随运动物体以相同的速度运动。弹簧基座模型可以定义为沿运动物体表面均布的弹簧力元, 可以实现较为均匀的悬浮特性模拟, 对于电动悬浮这种电磁力特性具有较好的模拟效果。

设置列车运动速度曲线和流场边界条件。设置列车运动速度曲线, 为模拟列车的高速运行, 设置列车运行速度为先加速后匀速, 其中为了保证计算的收敛性, 定义列车在 0.1 s 内从静止加速到

340 m/s, 随后一直匀速运行至 4.0 s。设置低真空管道流体域进出口为压力出口, 相对压力为 0。管道壁面边界为固定壁面, 列车为低真空管道流体域的内部运动边界。其中管道顶部与底部均采用无滑移壁面处理。

基于空气动力学-车辆动力学的大系统动力学研究理论, 利用提出列车流固耦合动力学分析计算方法和列车流固耦合数值计算模型, 对真空管道磁悬浮列车在多种运行条件下的管道内空气流场分布特性和列车气动及运动特性进行了研究。对比研究了不同悬浮刚度以及固定姿态运行下列车流场特性, 基于相关模型电磁力学分析结果, 设置悬浮刚度为 30, 300, 3000 kN/m 三种等级, 模型总质量为 4.8 t, 计算总时间为 4 s。

3 真空管道磁悬浮列车流固耦合特性分析结果

3.1 管道内流场分布特性

从图 3 和图 4 的不同悬浮刚度下列车周围压力分布图可以看出, 列车后部均存在多道反射波、斜激波。同时在刚度为 300 kN/m、3000 N/m 和固定姿态运行时, 列车顶部与管道壁面间形成了多道反射波, 而在悬浮刚度为 30 kN/m 时, 列车顶部则没有出现这种反射波。此外, 列车在 30 kN/m 悬浮刚度时, 列车头部顶端出现了一个明显的低压区域。在低悬浮刚度下, 列车周围的流场分布会与较高悬浮刚度下的流场分布出现明显差别, 表明悬浮运行的列车的悬浮刚度会对气动特性产生明显影响, 且悬浮刚度越低, 流固耦合效应越明显。

图 5 为 4 s 时刻不同悬浮刚度下列车周围速度及流线分布。从该图可以看出 30 kN/m 的悬浮刚度下, 列车尾部出现了两个明显的且非常靠近的高流速区域, 而悬浮刚度越大的工况, 车尾顶部的高流

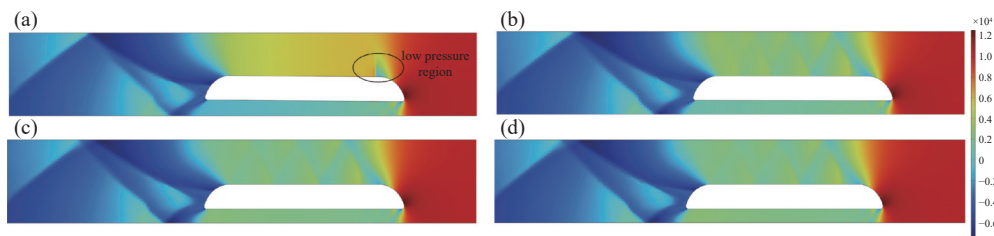


图3 4 s 时刻不同悬浮刚度下列车周围压力分布。(a) $k=30$ kN/m; (b) $k=300$ kN/m; (c) $k=3000$ kN/m; (d) 固定

Fig. 3 The pressure distribution around train with different suspension stiffness at 4 s. (a) $k=30$ kN/m, (b) $k=300$ kN/m, (c) $k=3000$ kN/m, (d) fix

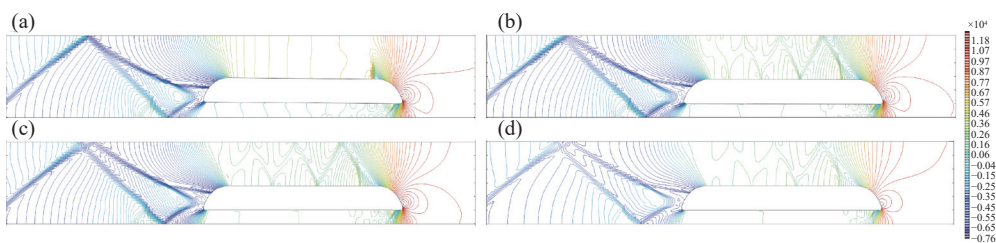


图4 4 s时刻不同悬浮刚度下列车周围压力等值线分布。(a) $k=30$ kN/m; (b) $k=300$ kN/m; (c) $k=3000$ kN/m; (d) 固定

Fig. 4 The pressure counter line around train with different suspension stiffness at 4 s. (a) $k=30$ kN/m, (b) $k=300$ kN/m, (c) $k=3000$ kN/m, (d) fix

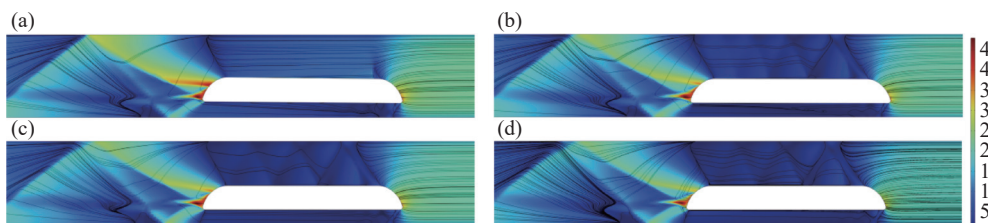


图5 4 s时刻不同悬浮刚度下列车周围速度及流线分布。(a) $k=30$ kN/m; (b) $k=300$ kN/m; (c) $k=3000$ kN/m; (d) 固定

Fig. 5 The speed distribution and streamline around train with different suspension stiffness at 4 s. (a) $k=30$ kN/m, (b) $k=300$ kN/m, (c) $k=3000$ kN/m, (d) fix

速区域表现越弱。主要原因是列车运行姿态变化更加后,导致流场分布明显变化,列车尾部流速出现升高。在 30 kN/m 的悬浮刚度下,列车顶部的流线分布比较均匀,相反在悬浮刚度较大和固定工况下,由于车顶反射波的存在,列车顶部流线出现曲折分布。当悬浮刚度逐渐增大后,流场分布于列车固定姿态运行的流场分布特性逐渐接近。因此,列车悬浮运行工况下,悬浮刚度较小会导致流场与固定姿态运行的流场特性出现明显差异,列车尾部和列车顶部的流场分布均与固定姿态运行工况存在较大差异,较小的悬浮刚度会导致流固耦合效应突显。

图6为流场悬浮刚度为 30 kN/m 工况下,不同时刻列车周围压力,可以从 0.5 s 和 1 s 时刻列车顶部也出现了固定姿态运行工况下的反射波,但是在 1.5 s 时刻,列车顶部反射波消失,并且在之后的时刻中不再出现。此外,列车头部的上方在 1.5 s 出现一个低压区域, 1.5 s ~ 3.5 s 该区域逐渐增大,而 3.5 s ~ 5 s 该区域逐渐减小,该低压区域面积随着列车运行呈现周期性变化。从 0.5 s ~ 5 s 时刻列车周围的压力分布可以看出,列车尾部流场较为复杂,存在多道斜激波和反射波,但是随着列车的运行相对较为稳定,而列车顶部和头部的波系相对更加简单,但是会随着列车运行发生明显的变化。总结可

知,列车的悬浮运行会导致列车存在非稳定流场中,尤其是列车顶部和头部流场变化明显。

图7所示4 s时刻不同悬浮刚度下列车车身压力分布,其中车头和车尾部分的压力分布均相对较为接近,二在车底和车顶的压力分布则存在明显的差别。其中车底压力分布为,悬浮刚度越低压力越低。悬浮刚度 30 kN/m 工况下,车顶的压力远高于其他三种工况的压力分布,这一特性在前文中的压力分布图也可以看出,车顶未出现明显的反射波,且压力较高。因此,不同的悬浮刚度会导致列车周围的压力分布存在明显差别,对列车受到的气动载荷也会产生相应的影响。

3.2 列车气动载荷特性

为进一步分析真空管道磁悬浮列车在非定常气动环境下列车的运行特性,利用空气动力学-车辆动力学真空管道磁悬浮列车流固耦合数值计算模型,对多种悬浮刚度条件下的列车运动力学特性进行数值计算分析,重点关注列车的气动载荷变化特征。

如图8所示,列车在不同悬浮刚度下受到的纵向气动载荷均在运行速度达到 340 m/s 的 0.1 s 时刻达到一个峰值,悬浮刚度为 300 kN/m、 3000 kN/m 和固定姿态运行工况下列车纵向气动载荷逐渐回落至一个较为稳定的值。而悬浮刚度 30 kN/m 工况

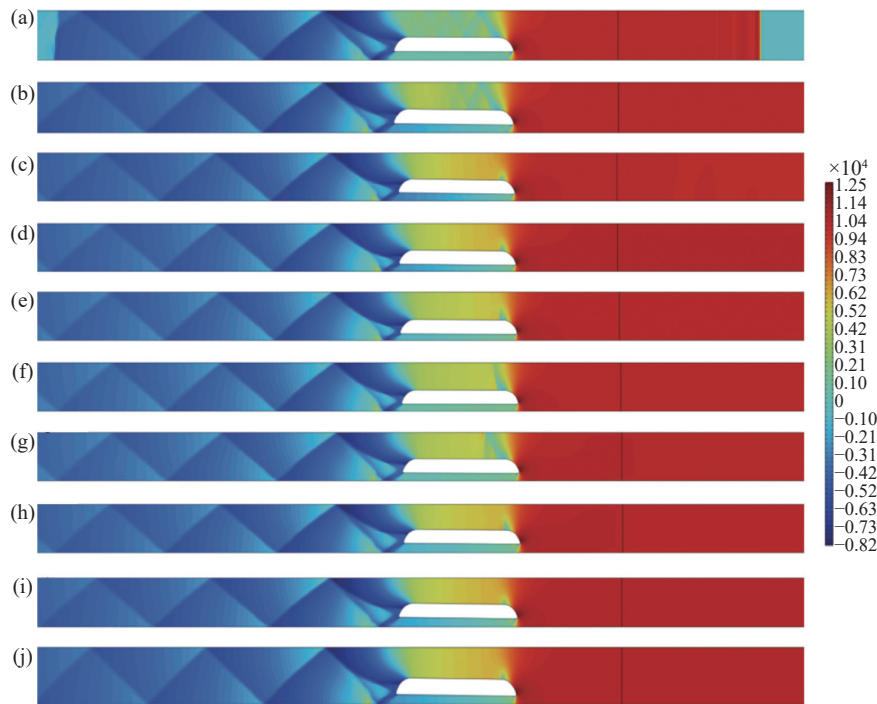


图6 不同时刻 $k=30$ kN/m 列车周围压力分布。(a) $t=0.5$ s; (b) $t=1.0$ s; (c) $t=1.5$ s; (d) $t=2.0$ s; (e) $t=2.5$ s; (f) $t=3.0$ s; (g) $t=3.5$ s; (h) $t=4.0$ s; (i) $t=4.5$ s; (j) $t=5.0$ s

Fig. 6 The pressure distribution around train with stiffness of 30 kN/m at different times. (a) $t=0.5$ s, (b) $t=1.0$ s, (c) $t=1.5$ s, (d) $t=2.0$ s, (e) $t=2.5$ s, (f) $t=3.0$ s, (g) $t=3.5$ s, (h) $t=4.0$ s, (i) $t=4.5$ s, (j) $t=5.0$ s

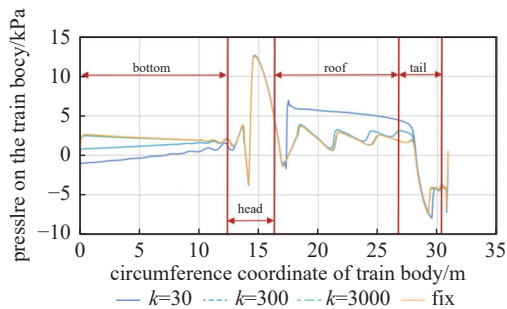


图7 4 s 时刻不同悬浮刚下列车车身压力分布

Fig. 7 The pressure distribution around train body with different suspension stiffness at 4 s

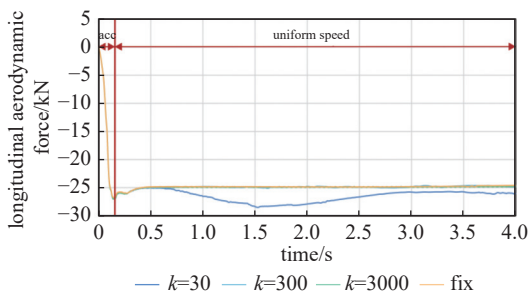


图8 不同悬浮刚下列车受到纵向气动载荷

Fig. 8 The longitudinal aerodynamic force with different suspension stiffness

下, 气动载荷在 1.5 s 左右时刻又出现一个峰值, 从而导致纵向气动载荷最大值明显高于其他三种工况。图 9 中列车受到的垂向气动载荷则体现出一定的振荡变化特性, 其中悬浮刚度为 300 kN/m 工况下, 列车垂向气动载荷呈现幅值增大的周期性变化。相对而言, 悬浮刚度为 3000 kN/m 工况和固定姿态运行下, 列车受到的气动垂向气动载荷较为接近。而悬浮刚度为 30 kN/m 工况下, 列车受到的垂向气动载荷远高于其他三种工况, 其变化也呈现出一定的周期性。气动载荷的周期性变化在图 10 中体现地更加明显。悬浮运行的三种工况下, 列车受到气动力矩均呈现出一定的周期性并且振荡的幅值均呈现增大趋势。列车受到垂向气动载荷和气动力矩最大值均随悬浮刚度的减小而增大。由于悬浮刚度不同导致列车姿态变化频率的不同, 气动载荷变化频率随悬浮刚度减小而减小。

实时在线流固耦合仿真结果显示列车受到的气动载荷和悬浮力均呈低频周期性变化。悬浮刚度的减小会导致列车受到的气动载荷幅值增加, 频率下降。随着时间推移, 列车受到的气动载荷呈现振荡幅值增大的态势, 表明流固耦合效应会不断增

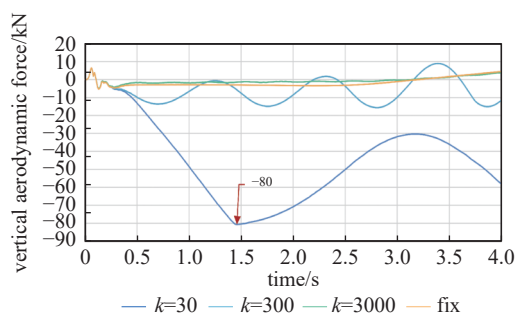


图9 不同悬浮刚度下列车受到垂向气动载荷

Fig. 9 The vertical aerodynamic force with different suspension stiffness

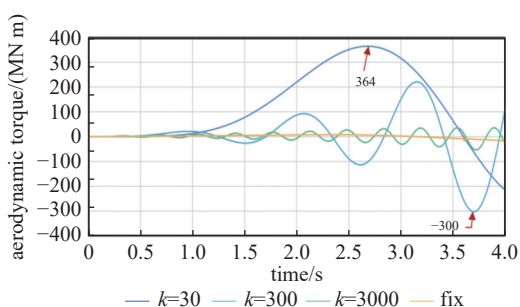


图10 不同悬浮刚度下列车受到气动力矩

Fig. 10 The aerodynamic torque with different suspension stiffness

强,如果没有有效地克服列车受到的气动载荷,抑制列车的振动,列车运行将逐渐受到更大的影响。

3.3 列车运动特性

图11为列车前后测点的垂向位移。在悬浮刚度为30 kN/m和300 kN/m两种悬浮刚度下,列车的垂向位移较大,最大幅值可达约270 mm和38 mm,而悬浮刚度为3000 kN/m时,列车测点位移最大幅值仅为2 mm左右。图12中列车的点头转动角度也是在这两种悬浮刚度下呈现较大的振荡幅值,其

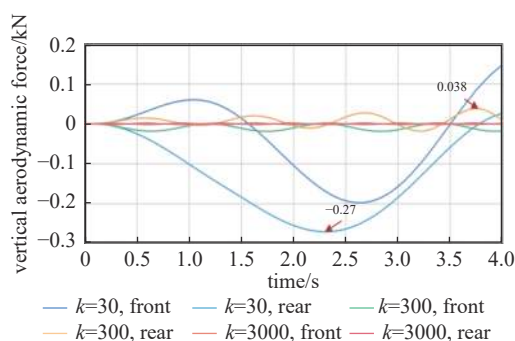


图11 不同悬浮刚度下列车测点位移

Fig. 11 The displacement at monitor points of train with different suspension stiffness

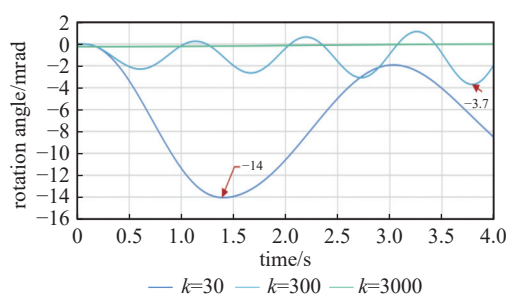


图12 不同悬浮刚度下列车转动角度

Fig. 12 The rotation angle of train with different suspension stiffness

最大幅值可达14 mrad和3.7 mrad。表明在这两种悬浮刚度下,列车会在气动载荷的作用下产生严重的振动,流固耦合效应尤为明显。由于气动载荷随着时间的推移呈现的幅值增大的特性也导致了列车的垂向位移及旋转角度呈现出了相似的特性。随着列车的运行,流固耦合效应将对悬浮列车的运行姿态影响越来越明显,对列车的运行安全性影响极大。

4 结论

针对真空管道磁悬浮列车悬浮运行时,列车与管道内流场间存在严重的流固耦合效应,提出了真空管道磁悬浮列车流固耦合动力学理论,并建立了真空管道磁悬浮列车实时在线流固耦合数值计算模型,分析真空管道磁悬浮列车的车辆流固耦合特性。研究发现:

(1) 列车悬浮运行列车尾部流场较为复杂,存在多道斜激波和反射波,但是随着列车的运行相对较为稳定,而列车顶部和头部的波系相对更加简单,但是会随着列车运行发生明显的变化。

(2) 实时在线流固耦合仿真结果显示列车受到的气动载荷均呈低频周期性变化。悬浮刚度的减小会导致列车受到的气动载荷幅值增加,频率下降。随着时间推移,列车受到的气动载荷呈现振荡幅值增大的态势,表明流固耦合效应会不断增强。

(3) 列车悬浮运行工况下,悬浮刚度较小会导致流场与固定姿态运行的流场特性出现明显差异,流固耦合效应突显。在30 kN悬浮刚度下,列车的位移和转动幅值可以达到270 mm和14 mrad,并且随着时间推移,列车受到的气动载荷呈现振荡幅值还有增大的态势。

这些研究结果表明悬浮运行的真空管道磁悬

浮列车随着运行时间的增加流固耦合效应会不断增强, 如果无法有效克服变化的气动载荷, 会导致列车运行姿态的变化不能受到有效的抑制, 行车安全将可能受到影响。

参 考 文 献

- [1] Taylor, Catherine L, Hyde D J, et al. Hyperloop commercial feasibility analysis: High level overview[R]. United States Department of Transportation, 2016
- [2] Liu J L, Zhang J Y, Zhang W H. Analysis of aerodynamic characteristics of high-speed trains in the evacuated tube[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(22): 137-143 (刘加利, 张继业, 张卫华. 真空管道高速列车气动特性分析 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(22): 137-143(in Chinese))
- [3] Zhou X, Zhang D Y, Zhang Y P. Numerical simulation of blockage rate and aerodynamic drag of high-speed train in evacuated tube transportation[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2008, 28(6): 535-538 (周晓, 张殿业, 张耀平. 真空管道中阻塞比对列车空气阻力影响的数值研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2008, 28(6): 535-538(in Chinese))
- [4] Opgenoord M, Caplan P C. Aerodynamic design of the hyperloop concept[J]. *AIAA Journal*, 2018, 56(11): 4261-4270
- [5] Wang Y B, Xuan Y, Zhang J B. Train aerodynamic resistance in transportation system of low vacuum tube[J]. *Chinese Railways*, 2023, (07): 53-59 (王友彪, 宣言, 张俊博. 低真空管道交通系统列车气动阻力研究 [J]. *中国铁路*, 2023, (07): 53-59(in Chinese))
- [6] Kim T, Kim K, Kwon H. Aerodynamic characteristics of a tube train[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Aerospace Science and Technology*, 2011, 99: 1187-1196
- [7] Kyeong S J, Thi T G, Jihoon K, et al. Effects of compressible flow phenomena on aerodynamic characteristics in Hyperloop system[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 117: 106970
- [8] Zhang X H, L T, Zhang J Y, et al. Aerodynamic choked flow and shock wave phenomena of subsonic evacuated tube train[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021 (04): 182-190 (张晓涵, 李田, 张继业, 等. 亚音速真空管道列车气动壅塞及激波现象 [J]. *机械工程学报*, 2021(04): 182-190(in Chinese))
- [9] Oh J S, Kang T, Ham S, et al. Numerical analysis of aerodynamic characteristics of hyperloop system[J]. *Energies*, 2019, 12(3): 1-17
- [10] Gillani S A, Panikulam V P, Sadasivan S, et al. CFD analysis of aerodynamic drag effects on vacuum tube trains[J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2019, 12(1): 303-309
- [11] Kang H, Jin Y, Kwon H, et al. A study on the aerodynamic drag of transonic vehicle in evacuated tube using computational fluid dynamics[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2017, 18(4): 614-622
- [12] Zhang Y. Numerical simulation and analysis of aerodynamic drag on a subsonic train in evacuated tube transportation[J]. *Journal of Modern Transportation*, 2012, 20(1): 44-48
- [13] Zhou P, Zhang J, Li T. Effects of blocking ratio and Mach number on aerodynamic characteristics of the evacuated tube train[J]. *International Journal of Rail Transportation*: 2019, 8(1): 27-44
- [14] Bao S, Hu X, Wang J, et al. Numerical study on the influence of initial ambient temperature on the aerodynamic heating in the tube train system[J]. *Advances in Aerodynamics*, 2020, 2(1): 18
- [15] Zhou P, Zhang J, Li T, et al. Numerical study on wave phenomena produced by the super high-speed evacuated tube maglev train[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 190: 61-70
- [16] Kim T K, Kim K H, Kwon H B. Aerodynamic characteristics of a tube train[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(12): 1187-1196
- [17] Hu X, Deng Z G, Zhang Y L, et al. Characteristics of spatial and temporal distribution of wave system in evacuated tube maglev transportation[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2022, 40(6): 146-154 (胡啸, 邓自刚, 张银龙, 等. 真空管道磁浮交通管内波系时空分布特征 [J]. *空气动力学学报*, 2022, 40(6): 146-154(in Chinese))
- [18] Li T, Song J Y, Zhang X H, et al. Theoretical and numerical studies on compressible flow around a subsonic evacuated tube train[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(15): 8261-8271
- [19] Zhou P, Li T, Zhang J Y, et al. Research on shock wave trains generated by the hyper train in the evacuated tube[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(2): 86-97 (周鹏, 李田, 张继业, 等. 真空管道超级列车激波簇结构研究 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(2): 86-97(in Chinese))
- [20] Zhou P, Zhang J. Aerothermal mechanisms induced by

- the super high-speed evacuated tube maglev train[J]. *Vacuum*, 2020, 173: 109142
- [21] Song J Y, Li T, Zhang J Y. Research on aerodynamic characteristics of evacuated tube train in dynamic operation[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2023, 37(01): 64–71 (宋嘉源, 李田, 张继业. 真空管道列车动态运行气动特性研究 [J]. *实验流体力学*, 2023, 37(01): 64–71(in Chinese))
- [22] Hou Z H. Flow structures and aerodynamic force/heating characteristics of high-speed tube train[D]. He Fei: University of Science and Technology of China, 2022 (侯自豪. 高速管道列车流动结构和气动力/热特性 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022(in Chinese))
- [23] Wang X F, Hu X, Li Z P, et al. The effect of track structure on the aerodynamic characteristics of evacuated tube maglev train[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2023, 37(03): 9–18 (王潇飞, 胡啸, 李宗澎, 等. 轨道结构对真空管道磁浮列车气动特性的影响 [J]. *实验流体力学*, 2023, 37(03): 9–18(in Chinese))
- [24] Yi Y Y, Huang Z D, Zhou Z B, et al. Analysis of shock wave characteristics of two-dimensional pipeline train intersection[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2023, 43(4): 350–360 (伊严严, 黄尊地, 周镇斌, 等. 二维管道列车交会激波特性分析 [J]. *真空科学与技术学报*, 2023, 43(4): 350–360(in Chinese))
- [25] Hou Z H, Mao K, Zhu Y J, et al. Progresses in key aerodynamic problems of low-vacuum tube trains[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2023, 41: 1–20 (侯自豪, 毛凯, 朱雨建, 等. 低真空管道列车关键气动问题研究进展 [J]. *空气动力学学报*, 2023, 41: 1–20(in Chinese))
- [26] Kou J, Fu C, Gao X L, et al. Progress on fluid-solid coupling of vacuum pipeline train and analysis of key technology[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2023, 37(3): 37–49 (寇杰, 符澄, 高兴龙, 等. 真空管道列车流固耦合研究进展及关键技术分析 [J]. *实验流体力学*, 2023, 37(3): 37–49(in Chinese))
- [27] Fu C, Kou J, Gao X L, et al. A coupled analysis method for aerodynamics and kinematics of maglev platform in a maglev flight wind tunnel. Chinese Invention Patent, CN202310778115.2[P] (符澄, 寇杰, 高兴龙, 等. 一种磁浮飞行风洞磁浮平台气动与运动力学耦合分析方法: 中国发明专利, CN202310778115.2[P](in Chinese))