

Aerodynamic Characteristics of Maglev Train on Low Evacuated Tube

Dawei Chen¹, Dilong Guo^{2*}

¹National Engineering Research Center, CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao Shandong

²Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing

Email: chendawei@cqsf.com, ¹guodl@imech.ac.cn

Received: May 16th, 2019; accepted: Jun. 4th, 2019; published: Jun. 11th, 2019

Abstract

Based on compressible Navier-Stokes equation, the aerodynamic characteristics of maglev train on different tube area and pressure are studied. The results indicated the flow field around maglev train in low evacuated tube is similar to that in open air, the annular space between maglev train and tube is similar to Laval nozzle and has the flow characteristics of expansion acceleration or compression deceleration, when the speed of maglev train reaches the critical speed, there will be shock wave at the rear of maglev train, the aerodynamic forces of maglev train increase with the decrease of tube area, the aerodynamic forces of the tail car will increase dramatically when the shock wave occurs at the tail of maglev train. The aerodynamic coefficients of maglev train decreases slightly with the increase of tube pressure, but tube pressure changes, resulting in Reynolds number changes, so as to the aerodynamic coefficients of maglev train are quite different.

Keywords

Low Evacuated Tube, Maglev Vehicle, Blockage Ratio, Tube Pressure, Aerodynamic Characteristics

低真空管道磁浮列车气动特性

陈大伟¹, 郭迪龙^{2*}

¹中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 国家工程研究中心, 山东 青岛

²中国科学院力学研究所, 流固耦合系统力学重点实验室学院, 北京

Email: chendawei@cqsf.com, ¹guodl@imech.ac.cn

收稿日期: 2019年5月16日; 录用日期: 2019年6月4日; 发布日期: 2019年6月11日

*通讯作者。

摘要

基于可压缩Navier-Stokes方程,研究了低真空管道条件下管道面积、管道压力对磁浮列车气动特性的影响。研究表明:磁浮列车在低真空环境和明线运行环境下流场具有相似性,列车与管道之间的环状空间类似于拉瓦尔喷管,具有膨胀加速或压缩减速的流动特性,磁浮列车速度达到临界速度时,磁浮列车尾部会出现激波。磁浮列车的气动力随着管道面积的减小而增大,磁浮列车尾部出现激波后,尾车的气动力会剧增。磁浮列车的气动力系数随着管道压力的增加下降,但管道压力变化大时,导致雷诺数变化大,从而列车的气动力系数有较大不同。

关键词

低真空管道,磁悬浮,阻塞比,管道压力,气动特性

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

列车运行阻力主要由机械阻力和空气阻力组成,对于轮轨形式的高速列车,当运行速度超过 300 km/h 时,空气阻力可以达到的总阻力的 75% [1]。根据 Davis 公式[2]:列车的运行的机械阻力与速度的一次成正比,空气阻力与速度平方成正比,因此,随着列车运行速度的进一步提高,空气阻力的占比将越来越大,同时,传统轮轨列车由于车轮-轨道之间的轮轨关系限制,存在的临界运行速度[3]。低真空管道磁浮列车是一种新型的交通运输系统,具有快速、环保、高效的特点[4]。低真空管道磁浮列车系统将一定真空度的管道与磁浮列车相结合,实现列车在无轮轨阻力,低空气阻力,低噪声模式下高速运行。1904 年,Robert Goddard 首先提出在波士顿至纽约间建立一条真空管道铁路,磁浮列车在管道内的运行速度为 1600 km/h [5] [6],1999 年,Daryl Oster 获得了真空管道运输系统的发明专利[7],2013 年,Elon Musk 提出了超级高铁(Hyperloop)的计划方案[8]。目前,全球已经掀起了真空管道高速列车研究的热潮。

周晓[9] [10]等基于不可压缩粘性流,对二维管道内的真空管道列车气动特性进行了研究。得到了真空管道内列车空气阻力的影响因素及相关影响规律。文章中的计算物理模型为不可压缩粘性流,由于管道运行列车的速度已经超过不可压缩的范畴,加之所采用的几何模型为二维模型,与真实列车有较大差别,因此,得到的结果是不够准确的。刘加利等[11] [12]基于三维可压缩粘性流,研究了管道压力、阻塞比等对列车气动阻力、噪声等的影响。文中所用到的模型未考虑列车底部与悬浮板的相互作用,因此,未考虑气动升力的变化规律。黄尊地等[13]对真空管道内运行列车的外流场算法进行了研究。得到了三维效应、压缩效应和非定常效应对列车外流场的影响。文中把计算模型分为静态模型和动态模型,分别用可压缩和不可压缩来计算真空管道内运行列车的气动特性,实际上,文中分析比较中采用的不可压模型和可压缩模型,静态计算和动态计算在问题的提出上就存在失当之处,如文中的动态算法把列车的波系解释成压缩波和膨胀波,这是对管道内列车运行环境的误解。因此,亟需对管道列车运行气动特性的进行解释。

本文从管道内磁浮列车流场的形成入手,着重于研究管道压力、阻塞比对于真空管道磁浮列车的气动特性影响。

2. 计算模型和网格

2.1. 计算模型

本文主要研究阻塞比、管道压力等因素对低真空管道磁浮列车的气动特性的影响规律, 因此, 对计算模型进行了适当简化, 本文采用头车 - 中间车 - 尾车三编组形式的列车模型, 其中头车尾车具有相同形状。整个车身做光滑处理, 没有任何附属部件, 计算模型如图 1 所示, 列车头、尾车车长为 28 m, 中间车车长为 25 m, 三编组总长度包括车车间隙为 82 m, 列车底部与磁浮板的间距为 20 mm, 车身的最大断面面积为 10 m^2 。进行管道面积变化时, 保证车体和悬浮架参数不变, 对管道面积按比例进行缩比。图 1 给出了本研究的计算模型。



Figure 1. The schematic diagram of computational model
图 1. 计算模型示意图

2.2. 计算域与计算网格

计算域如图 2 所示, 由于列车运行的速度在亚声速范围, 为了减小计算区域对计算结果的影响, 考虑网格量及计算精度, 入口和出口设置在距离车鼻 360 m 远处, 约为特征长度(车高)的 90 倍。整场采用结构化网格划分, 图 3 为部分计算区域的网格图, 壁面的第一层网格高度为 10^{-5} m , 增长比为 1.2, 保证壁面 Y^+ 在 1 的量级范围内, 整场网格数量约为 4500 万。

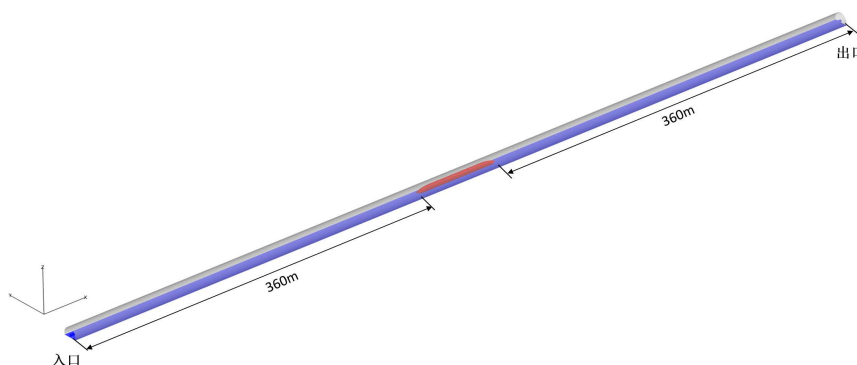


Figure 2. The computational domain
图 2. 计算区域

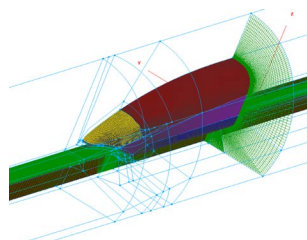


Figure 3. The local computational mesh
图 3. 局部计算网格图

3. 计算方法

由于涉及到低真空度范围内的计算, 因此, 需要考虑连续介质模型是否适合计算。在管道内, 当管道的压力降低时, 管道内空气的密度会降低, 也即管道内的空气会越来越稀薄。通常用克努森数(Knudsen)表示空气的稀薄程度, 当克努森数小于 0.01 时, 气体流动属于连续介质的范畴。克努森数定义为分子平均自由程与流动特征长度的比值, 其表达式为:

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (1)$$

式中: Kn ——克努森数, λ ——分子平均自由程, L ——流动特征长度。

分子的平均自由程表达式为:

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi d^2 p} \quad (2)$$

式中: K_B ——玻尔兹曼常数, $K_B = 1.3805 \times 10^{-23}$, T ——温度, d ——分子直径, p ——压力。

由(2)式可计算得到在管道压力在 0.01 atm 至 1 atm 时的分子平均自由程变化范围约为, 取高速铁路的高度为特征长度(通常约为 4 m), 则可以得到:

$$Kn = \frac{\lambda_{\max}}{L} = 1.5 \times 10^{-6} \ll 0.01 \quad (3)$$

本文中, 管道内的空气压力最小为 0.01 atm, 可见, 本文的计算可以采用连续介质模型。

本文使用大型商业软件 Fluent 进行流场计算, 控制方程为三维定常可压缩 N-S 方程, 离散方法采用基于格心格式的有限体积方法, 空间离散格式采用 Roe 格式, 粘性项采用二阶中心差分格式, 时间离散采用 LU-SGS 隐式离散方法, 湍流模型为 $k-\omega$ SST 模型。

边界条件: 由于真空管道内磁浮列车运行速度处于亚音速范围, 因此, 在计算域的入口和出口均采用无反射边界条件。为了模拟车体与管道, 磁浮板的相对运动, 设置管道、磁浮板与来流具有相等的速度。车体壁面为无滑移固定边界条件。

4. 计算结果及分析

本文首先分析低真空管道磁浮列车周围流场的流动特性, 然后分别分析管道面积、管道压力对低真空管道磁浮列车气动特性的影响。本文中用到的管道面积、列车速度和管道压力会在分析影响规律时给出。

4.1. 低真空管道列车扰流的流场特性

由于列车是在密闭的管道内运行, 不会近似于列车进出隧道产生压缩波和膨胀波的过程, 可以近似于明线运行状态, 所不同的是其周围有管道边界。不失一般性, 这里以真空管道面积 80 m^2 、列车运行速度 600 km/h 、管道压力位 0.3 atm 为例进行流场分析。

图 4 为列车头部的压力云图和纵剖面流线图, 其中流线图的颜色深浅表示气流速度大小。可以看出: 在列车头部附近, 气流在流经鼻锥后被导向车顶和车底。图 5 给出了对称面上的速度图。可以看出: 气流在接近列车鼻锥时逐渐减速, 在鼻锥前端滞止为零, 在列车鼻锥处形成驻点和高压区, 气流流过鼻锥后, 在车体表面形成边界层, 远离边界层区域的气流由于流道的减小, 速度逐渐加大, 在车顶处达到最大。同样, 流向鼻锥下方的气流也具有同样的趋势, 如果来流的速度小于音速, 不同管道面积, 不同管道压力条件下, 列车头部的流场均表现出同样的流动特征。

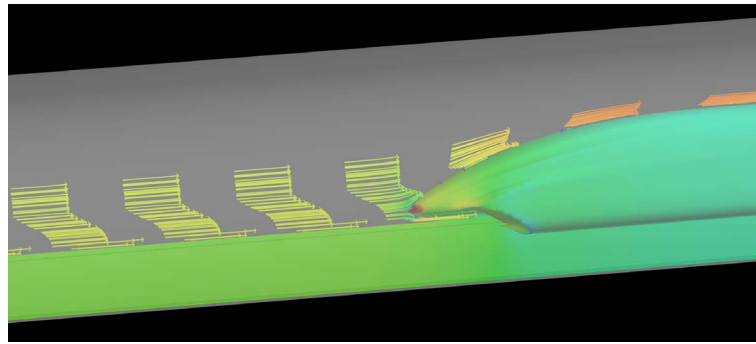


Figure 4. The train head pressure contours and the longitudinal profile streamlines
图 4. 列车头部的压力云图和纵剖面流线图

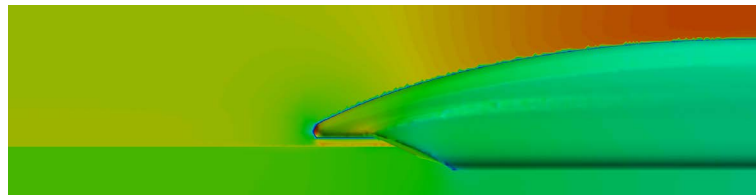


Figure 5. Velocity contours on symmetry plane
图 5. 对称面上的速度图

图 6 为列车尾部车体表面压力云图及对称面速度云图, 气流从列车前部流向后部, 边界层不断变厚, 导致尾车车体上部边界层厚于头车, 当气流到达尾车流线型部位时, 由于流道面积的增大, 气流的速度减小。图 7 为列车尾部流场的流线图, 可以看出, 由于列车在上部、侧向的压差, 导致上部气流、侧向气流由于剪切作用形成了一系列的涡对。这些列车周围的局部流动特征与列车在明线运行时类似。

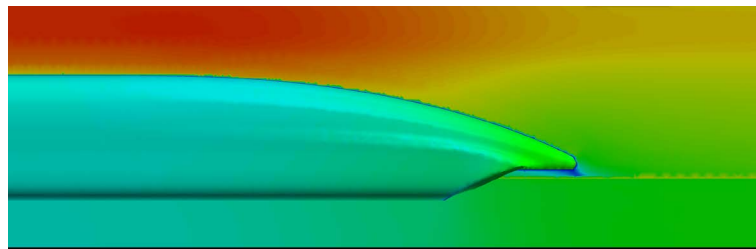


Figure 6. Pressure contours on the train tail and the velocity contours on symmetry plane
图 6. 列车尾部压力云图及对称面速度云图

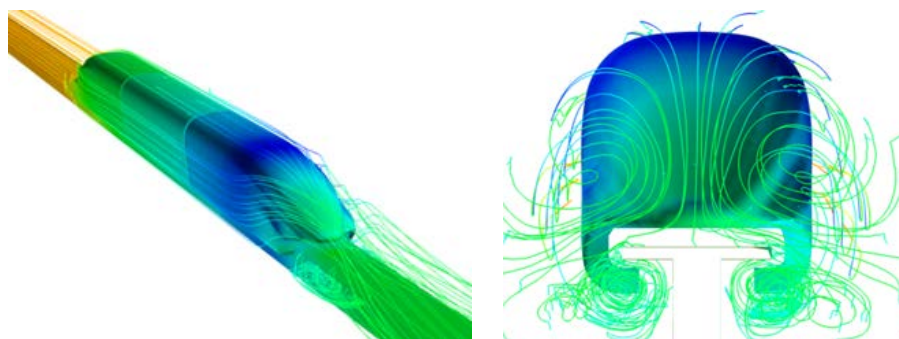


Figure 7. Streamlines in the tail flow field
图 7. 尾部流场流线图

需要指出的是, 上述流场特征是在真空管道内不出现激波时的。实际上, 气流流经列车时, 列车与管道形成的环状空间与拉瓦尔喷管相似, 在不考虑列车的局部细节条件下, 该环状空间可以近似于一维变截面的管道, 管道内的流动符合一维定常等熵流动的特征, 即具有膨胀加速或压缩减速的流动特性, 收敛管道中的亚声速流动和扩张管道内的超声速流动是膨胀加速的, 沿着管道流速不断增加, 而压强、密度和温度不断减小; 扩张管道中的亚声速流和收敛管道中的超声速流是压缩减速的, 沿着管道流速不断降低, 而压强、密度和温度却不断增加。下面以真空管道面积 80 m^2 、列车运行速度 1000 km/h 、管道压力 0.3 atm 进行说明。

当列车运行速度达到 1000 km/h 时, 其 Mach 数等于 0.817 , 气流从入口到达列车后, 由于管道面积的收敛, 沿着管道流速不断增加, 在扩张管道与收敛管道的交界处, 此位置位于列车的尾车处, 气流流速达到声速, 在扩张管道, 即在尾车的流线型后端气流进一步加速, 达到了超音速, 管道中出现了激波, 激波在管道中的反射将进一步加剧管道中的流动条件, 同时, 由于激波的出现, 尾车的气动特性也将发生很大的变化, 通过改变背压的条件, 改变尾车截面的变化率将会改变激波的强度, 改善尾车的气动特性。因此对于低真空管道运行的磁浮列车, 其头、尾车设计成非对称形式将有利于列车的气动性能(图 8)。

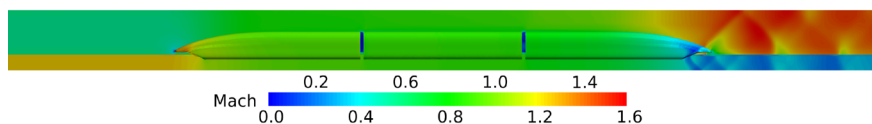


Figure 8. Mach contours on symmetry plane
图 8. 对称面马赫数云图

4.2. 管道面积对于列车气动特性的影响

当管道面积变化时, 由于列车的截面积保持不变, 因而会导致管道内堵塞比变化。如果管道内出现激波, 堵塞比的改变将导致激波位置、强度发生改变, 气动性能也发生改变。

为了便于分析, 定义无量纲系数即列车气动阻力系数和气动升力系数公式如下:

$$C_D = \frac{F_x}{0.5\rho_\infty Av_\infty^2} \quad (4)$$

$$C_L = \frac{F_z}{0.5\rho_\infty Av_\infty^2} \quad (5)$$

式中, C_D 、 C_L 为列车空气阻力系数, F_x 、 F_z 为列车空气阻力和升力, ρ_∞ 管道内空气密度, v_∞ 为列车运行速度, A 为参考面积。

图 9 为管道内压力 0.3 atm 、速度分别为 600 km/h 、 800 km/h 、 1000 km/h 时阻力系数随管道面积的变化。从图中可知: 当列车运行速度为 600 km/h 时, 随着管道面积的减小, 头车的阻力系数逐渐增大, 中间车也表现了同样的趋势, 而尾车在管道面积大于 70 m^2 时, 阻力系数很小, 接近于零, 变化也很小, 但管道面积小于 60 m^2 时, 其阻力系数会随着管道面积的减小大幅增加。从头车、中间车、尾车的阻力系数来看, 在管道面积大于 60 m^2 时, 三车的阻力系数大小排列为: 头车 > 中间车 > 尾车。而当管道面积为 40 m^2 时, 尾车的阻力系数大于中间车的阻力系数。出现这种现象可能是在时速 600 km 下, 管道面积为 60 m^2 时。尾车周围的流动状态发生很大的改变, 在尾车出现了激波所导致。当列车运行速度为 800 km/h 和 1000 km/h 时, 三车的阻力系数大小排列为: 尾车 > 头车 > 中间车, 随着管道面积减小, 阻力系数增大, 三车的阻力系数随管道面积不如速度为 600 km/h 时变化剧烈。说明此时列车周围的流动

状态是相似的。图 10 为管道内压力 0.3 atm、速度分别为 600 km/h、800 km/h、1000 km/h 时三车升力系数随管道面积的变化。可见，尾车的升力系数要远远大于头车和中间车，而且，随着管道面积的减小，头车和中间车升力系数略微增加，而管道面积变化对于尾车的升力系数影响较大，特别是当管道面积小于某一临界值时，会出现尾车升力系数的剧增。图 11 给出了管道面积为 80 m²，速度为 800 km/h，管道压力为 0.3 atm 时对称面的 Mach 数云图，从图中可以看出，在列车的尾部出现了很明显的激波，可知在速度大于 800 km/h 时，列车的尾部将会出现激波。对照相应的阻力系数和升力系数，可以知道，当尾车出现激波后会引尾车气动性能的剧烈变化。

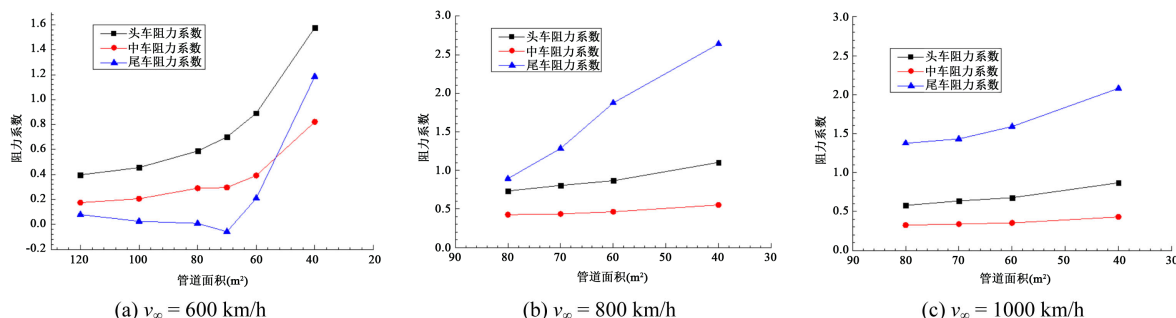


Figure 9. Coefficients of drag on tube area at different speed

图 9. 不同速度下阻力系数随管道面积变化

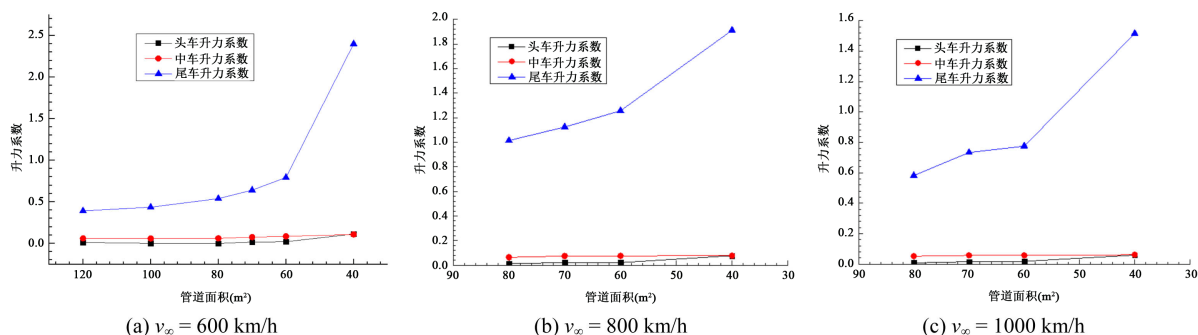


Figure 10. Coefficients of lift on tube area at different speed

图 10. 不同速度下升力系数随管道面积变化

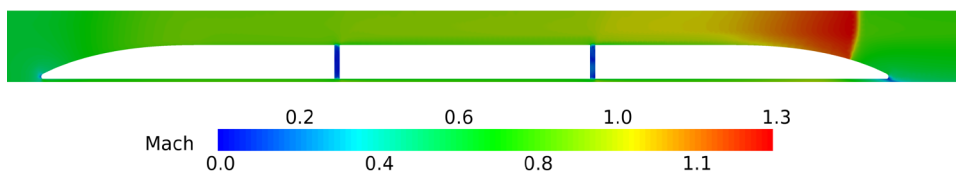


Figure 11. Mach contours on symmetry plane

图 11. 对称面马赫数云图

4.3. 管道压力对于列车气动特性的影响

衡量气体分子热运动的剧烈程度由温度来表现，气体分子运动越快，温度越高。管道内气体的压力是气体分子热运动作用的统计效应，当温度不变时、管道内的压力进行变化时，也意味着管道内气体的密度发生了改变，根据 Re 的定义，可知，管道中气体的单位雷诺数发生改变，当真空管道内压力从 0.01 atm 变化到 1 atm 时，真空管道内的单位雷诺数将会相差 100 倍，从而可能会对气动力产生影响。

图 12 为速度分别为 600 km/h 和 1000 km/h 时各车阻力系数随管道压力的变化图。从图中可以看出：当管道压力小于 0.2 atm 时，阻力系数随着管道压力的增加出现比较明显的下降，而当管道压力大于 0.2 atm 时，阻力系数随着管道压力的增加变化略微下降，变化很小。图 13 的升力系数随管道压力的变化图也表现出了相同的趋势，这说明了雷诺数变化大时，列车的气动力系数有较大不同。

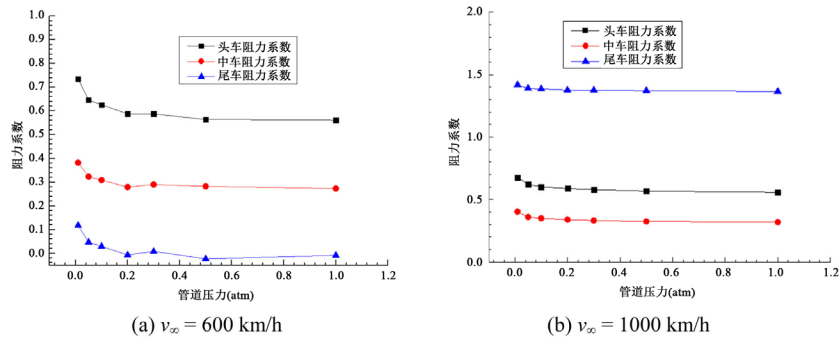


Figure 12. Coefficients of drag on tube pressure at different speed

图 12. 不同速度下阻力系数随管道压力变化

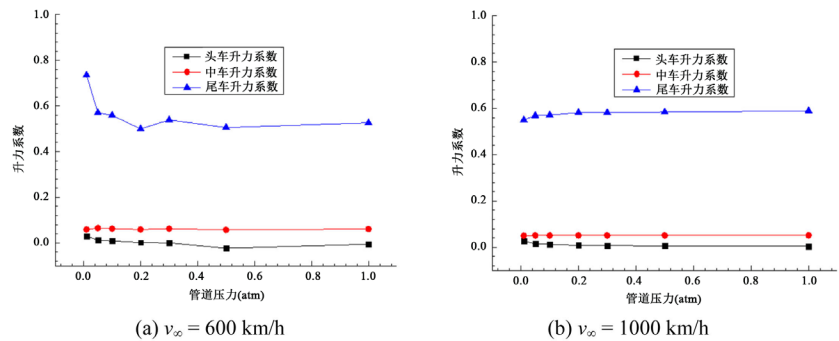


Figure 13. Coefficients of lift on tube pressure at different speed

图 13. 不同速度下升力系数随管道压力变化

5. 结论

基于可压缩 Navier-Stokes 方程，研究了低真空环境下管道面积、管道压力对磁浮列车气动特性的影响，得到了以下结论：

1) 低速运行时，低真空环境下磁浮列车与明线磁浮列车的流场特性相似。列车与管道组成的环状空间形成了拉瓦尔喷管效应，磁浮列车到达临界速度时，列车尾部会出现激波，管道面积不同时，管道中出现激波的磁浮列车临界速度不同。

2) 列车的气动力随着管道面积的减小而增大，列车尾部出现激波后，尾车的气动力会急剧增大。

3) 列车的气动力系数随着管道压力的增加下降，但管道压力变化大时，导致雷诺数变化大，从而列车的气动力系数有较大不同。

参考文献

- [1] 邓自刚, 张勇, 王博, 张卫华. 真空管道运输系统发展现状及展望[EB/OL]. 西南交通大学学报, 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20180914.1248.004.html>, 2019-02-07.
- [2] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [3] Joseph, A.S. (2001) Aerodynamics of High-Speed Trains. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **33**, 371-414.

<https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.33.1.371>

- [4] 沈志云. 关于我国发展真空管道高速交通的思考[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(2): 133-137.
- [5] Robert, H.G. (1945) Apparatus for Vacuum Tubetransportation. US 2488287.
- [6] Robert, H.G. (1950) Vacuum tube Transportation System. US 2511979.
- [7] Daryl, O. and Crystal, R.F. (1999) Evacuated Tubetransportation. US 5950543.
- [8] Elon, M. (2013) Hyperloop Alpha. SpaceX. America. http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha.pdf
- [9] 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.
- [10] 周晓. 真空管道运输高速列车空气阻力数值仿真[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [11] 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.
- [12] 刘加利, 张继业, 张卫华. 真空管道高速列车气动噪声源特性分析[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(10): 1026-1031.
- [13] 黄尊地, 梁习锋, 常宁. 真空管道交通列车外流场仿真算法分析[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(6): 1244-1250.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-498X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ijm@hanspub.org