

真空管道列车悬浮电磁铁散热性能研究

魏龙涛, 胡站伟, 杨升科, 郭奇灵

(中国空气动力研究与发展中心 结冰与防除冰重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘要: **目的** 研究真空管道交通中磁浮列车悬浮电磁铁温度随管道内真空度及环境温度的变化规律。**方法** 建立三维电磁铁模型, 利用 Fluent 软件研究真空度 (0~80 kPa)、环境温度 (283~323 K) 对电磁铁温升性能的影响, 并对 Realizable $k-\varepsilon$ 和 RNG $k-\varepsilon$ 2 种湍流计算模型进行对比。**结果** 电磁铁表面温度随真空度的增大而升高, 当真空度超过 60 kPa 时, 电磁铁表面温度快速升高。随着环境温度的增加, 电磁铁表面温度呈近似线性关系增大。Realizable $k-\varepsilon$ 和 RNG $k-\varepsilon$ 2 种湍流模型的仿真结果基本相同。**结论** 真空度和环境温度对悬浮电磁铁散热性能均有很大影响, 在设计真空管道列车时, 需考虑电磁铁散热能力, 并采取相应措施。

关键词: 管道列车; 仿真; 悬浮电磁铁; 真空度; 环境温度

中图分类号: U237 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2022)06-0141-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.06.020

Heat Dissipation Performance of Suspension Electromagnet in the Evacuated Tube

WEI Long-tao, HU Zhan-wei, YANG Sheng-ke, GUO Qi-ling

(Key Laboratory of Icing and Anti/De-Icing, China Aerodynamics Research and Development Center, Sichuan Mianyang 621000, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the temperature of suspension electromagnet of maglev train with vacuum degree and ambient temperature in the evacuated tube. The influence of vacuum degree (0~80 kPa) and ambient temperature (283~323 K) on heat dissipation performance of suspension electromagnet is studied with Fluent software. The Realizable $k-\varepsilon$ and RNG $k-\varepsilon$ turbulence models are compared. The results show that the surface temperature of the electromagnet increases with the increase of the vacuum degree. When the vacuum degree exceeds 60 kPa, the surface temperature of the electromagnet increases rapidly. The surface temperature of the electromagnet increases in an approximately linear relationship with the increase of the ambient temperature. The simulation results of Realizable $k-\varepsilon$ and RNG $k-\varepsilon$ turbulence models are basically the same. The vacuum degree and ambient temperature have a great influence on the heat dissipation performance of the suspension electromagnet. When designing the evacuated tube train, the heat dissipation capacity of the electromagnet should be considered and corresponding measures should be taken.

KEY WORDS: evacuated tube transportation; simulation; suspension electromagnet; vacuum degree; ambient temperature

收稿日期: 2021-04-23; 修订日期: 2021-05-25

Received: 2021-04-23; Revised: 2021-05-25

作者简介: 魏龙涛 (1994—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为飞机结冰及防除冰技术。

Biography: WEI Long-tao (1994-), Male, Master, Assistant engineer, Research focus: aircraft icing and anti-icing technology.

通讯作者: 胡站伟 (1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为试验空气动力学和流动测量技术。

Corresponding author: HU Zhan-wei (1984-), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: experiment aerodynamics and flow measurement technology.

引文格式: 魏龙涛, 胡站伟, 杨升科, 等. 真空管道列车悬浮电磁铁散热性能研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(6): 141-146.

WEI Long-tao, HU Zhan-wei, YANG Sheng-ke, et al. Heat Dissipation Performance of Suspension Electromagnet in the Evacuated Tube[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 141-146.

随着社会的不断进步,人们对于出行交通工具速度的要求越来越高。目前,最快的出行方式是乘坐飞机,然而,飞机受天气的影响比较严重,且运载量相对较小^[1-4]。在地面轨道运输中,由于稠密大气的存在,空气阻力对高速列车的影响不容忽视。有关数据表明,当列车的行驶速度大于 400 km/h 时,空气阻力会超过列车运行总阻力的 80%^[5-6]。同时,随着列车行驶速度的提升,行驶过程中的气动噪声也会急剧增加^[7-8]。因此,在地面大气环境中,列车的最高行驶速度一般不会超过 400 km/h。

真空管道列车采用“真空管道+磁浮列车”技术,使列车在真空环境中行驶,从而减小列车行驶过程中的空气阻力和气动噪声,可实现全天候的地面高速运输^[9-11]。2021年1月13日,西南交通大学启用的高温超导高速磁浮工程化样车试验线,其最高行驶速度预计将大于 600 km/h。该项目的启用,进一步提升了建设真空管道列车的可行性。

真空管道列车由于其环保性和节能性,是未来最具有发展潜力的高速铁路运输,但也具有许多新的挑战。例如,磁浮列车悬浮电磁铁在运行过程中,在产生磁场的同时会产生大量热,在地面环境时,走行风可以快速将产生的热带走,但在低真空环境下,走行风的散热效果会降低很多。在密封管道中,列车高速行驶产生的气动热不能像在露天环境中那样散发到周围环境去,并且会不断聚集,导致管道内温度越来越高,影响悬浮电磁铁的散热,而当电磁铁的温度超过一定值时,会导致电磁铁不可逆的退磁,影响行车安全。近年来,已有很多学者和研究人员开展了对真空管道列车的研究。周晓等^[12-13]研究了真空管道中阻塞度以及管道环境压力对列车空气阻力的影响规律。周鹏等^[14]对超级列车在低真空环境中运行时的流场结构及气动热的变化规律进行了研究。包世杰等^[15]研究了不同初始环境温度对管道列车气动热环境的影响。张克锐等^[16]研究了真空管道列车运行马赫数对气动噪声的变化规律。刘少克等^[17]仿真分析了磁浮列车用混合电磁铁电流与温度场的关系。以上研究主要集中在对整车气动阻力、气动噪声以及气动热等方面,关于真空环境对悬浮电磁铁散热性能的研究较少。

本文利用 Fluent 软件,研究了高速磁浮列车悬浮电磁铁表面温度随真空度及环境温度的变化规律,并对 Realizable $k-\varepsilon$ 和 RNG $k-\varepsilon$ 两种湍流模型的计算结果进行了对比。

1 三维模型

图 1 为简化后的三维模型,包括悬浮电磁铁、整流罩、长定子、辅助装置,磁浮列车在稳定运行时,

电磁铁上表面与长定子下表面之间的距离约为 10 mm。电磁铁由线圈和铁芯组成,通过控制线圈中电流的大小来产生磁场,线圈中电流的电阻损耗是造成电磁铁温升的热源。在仿真计算时,将线圈和铁芯看成是一个整体的体热源,并忽略单个电磁铁与电磁铁之间的间隙,简化后的电磁铁俯视图如图 2 所示。在本次研究中,将体热源简化为面热源,只对流体域进行计算,通过分析电磁铁的表面温度来研究电磁铁温度随真空度及环境温度的变化规律。

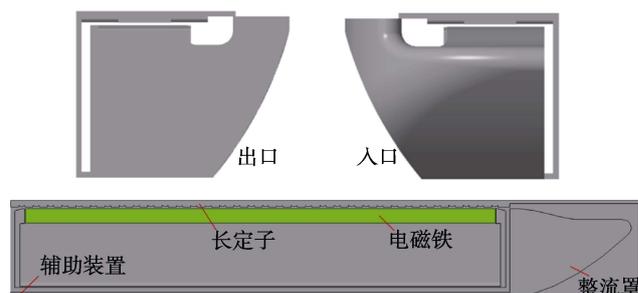


图 1 三维模型

Fig.1 Simulation model



图 2 电磁铁俯视图

Fig.2 The top view of electromagnet

电磁铁中的热源是由线圈电阻损耗产生的。在 Fluent 计算中,用等效面热源处理,热源项按式(1)计算^[18]。

$$Q = \frac{I^2 R}{S} \quad (1)$$

式中: Q 为线圈的单位面积发热功率; I 为线圈电流; R 为线圈电阻; S 为电磁铁总表面积。在本次研究中,假设电磁铁供电电流为 30 A,经计算,电磁铁的表面热源项为 2 880 W/m²。

2 仿真计算

2.1 计算工况及边界条件

在未来,真空管道列车将主要用于长途载人运输,真空管道的长度一般为几十到几千公里。根据中国空气动力研究与发展中心 3 m×2 m 结冰风洞真空系统的使用经验^[19],在长距离管道中,很难形成高真空环境,并且,在高真空环境中,一旦车体发生泄露,会对车厢内乘客的生命安全造成威胁^[20]。因此,本文只研究在低真空环境下真空度(0~80 kPa)对电磁铁温升变化规律的影响。目前高速列车的行驶速度一般不会超过 300 km/h,即使未来建成真空管道列车,也不会马上提速太多,故本文研究的列车行驶速度为 600 km/h。电磁铁处于列车运行稳定时的悬浮状态,

面热源为 2 880 W/m²。

计算区域如图 3 所示, 入口和出口设置为压力远场, 壁面设置为固定壁面, 湍流模型采用 Realizable *k-ε* 模型, 壁面函数选用 Enhanced wall treatment。网

格划分时, 采用四面体网格单元, 网格总数约 1 700 万。真空度和环境温度根据具体的计算工况进行设置, 见表 1。其中, 真空度定义为: 真空度=标准大气压强 - 绝对压强。

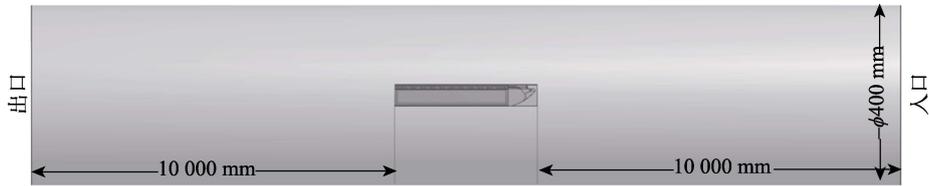


图 3 计算区域
Fig.3 Calculation area

表 1 计算工况
Tab.1 Calculation conditions

参数	温度恒定					压力恒定				
速度/(km·h ⁻¹)	600					600				
真空度/kPa	0	20	40	60	80	0				
环境温度/K	303					283	293	303	313	323

2.2 数学模型

在真空管道中, 随着真空度的升高, 空气稀薄效应越来越明显, 稀薄程度可用 Knudsen 数表示:

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (2)$$

式中: *Kn* 为 Knudsen 数; λ 为分子平均自由程; *L* 为流动特征长度。

当 *Kn*<0.001 时, 流动处于连续介质区, 根据文献[11]和[21]中作者对真空管道中的流动状态分析可知, 在本文研究的真空度及温度范围内, 流体处于连续流状态。连续流体的流动与传热包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程 3 个基本守恒方程, 分别为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度; *u*、*v*、*w* 分别为速度在 *x*、*y*、*z* 方向上的速度分量。

$$u \frac{\partial U_i}{\partial x} + v \frac{\partial U_i}{\partial y} + w \frac{\partial U_i}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

式中: *p* 为压力; ν 为运动黏度; *U_i* 为 *i* 方向的速度分量。

$$u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} + w \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

式中: α 为热扩散系数; *t* 为流体温度。

3 结果与分析

3.1 真空度的影响

磁浮列车在高速运行时, 悬浮电磁铁主要是通过

高速气流进行对流换热。对流换热系数与雷诺数有关, 湍流时, 雷诺数越大, 对流换热系数越大。雷诺数又与空气密度有关, 真空环境下, 空气密度降低, 雷诺数减小, 使得对流换热系数减小, 因此电磁铁散热能力减弱。

速度为 600 km/h, 环境温度为 303 K, 真空度分别为 0、20、40、60、80 kPa 时, 电磁铁上表面的温度分布如图 4 所示(云图自上向下为入口至出口方向)。由图 4 可以看出, 第 3 块和第 4 块电磁铁之间出现了一个局部高温区, 这是模型由于自身结构, 气流在该部位产生分离和回流, 对流换热不均匀, 同时本次研究只对流场区域进行研究, 只考虑了电磁铁表面对流换热, 忽略了电磁铁的自身导热, 从而造成电磁铁表面局部温度过高, 因此主要对电磁铁表面的平均温度进行分析。图 4 中, 电磁铁表面温度非对称分布, 电磁铁左侧温度略高于右侧, 出口位置温度高于入口位置。本文选取的是列车第 1 段电磁铁, 越靠后, 走行风的散热效果会越低, 因此需逐段采取措施加强电磁铁换热。

电磁铁表面平均温度和最高温度随真空度的变化曲线如图 5 所示。由图 5a 可知, 真空度分别为 0、20、40、60、80 kPa 时, 电磁铁表面的平均温度分别为 343.2、348.4、356.6、372.4、416.5 K。真空度每增加 20 kPa 时, 电磁铁表面平均温度分别依次增加了 5.2、8.2、15.8、44.1 K。随着真空度的增加, 电磁铁温度的增加速度越来越快, 特别是当真空度大于 60 kPa 时, 电磁铁表面的平均温度增加超过 40 K。由图 5b 可以看出, 电磁铁表面最高温度的增加趋势与电磁铁表面平均温度的增加趋势基本一致。因此,

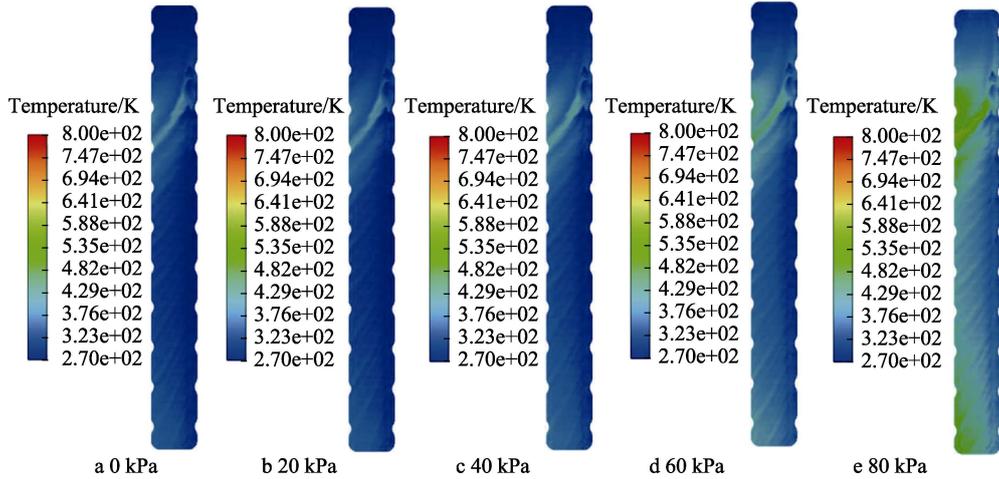


图4 不同真空度下电磁铁表面温度分布云图

Fig.4 Surface temperature distribution of electromagnet under different vacuum degrees

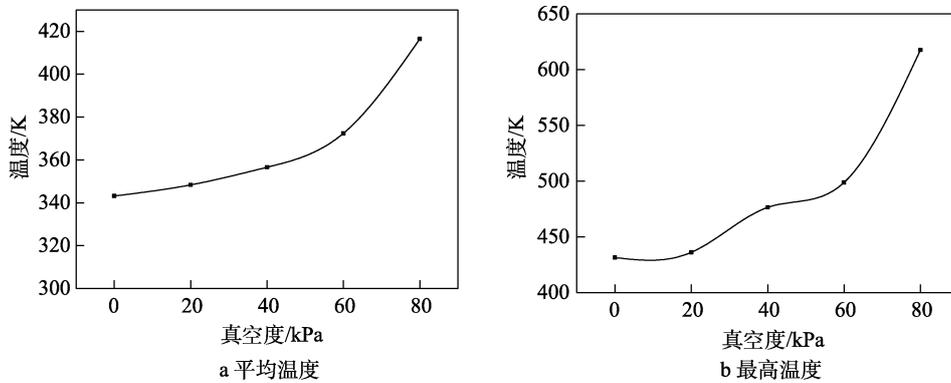


图5 电磁铁表面平均温度和最高温度随真空度的变化曲线

Fig.5 Curve of average (a) and maximum (b) surface temperature of electromagnet with vacuum degree

就电磁铁散热性能方面考虑,真空管道列车运行时的真空度不应超过 60 kPa。

3.2 环境温度的影响

速度为 600 km/h,真空度为 0 kPa,环境温度分

别为 283、293、303、313、323 K 时,电磁铁上表面温度分布如图 6 所示。

电磁铁表面平均温度和最高温度随环境温度的变化曲线如图 7 所示。环境温度从 283 K 依次增加到 323 K 时,电磁铁表面的平均温度分别为 321.8、

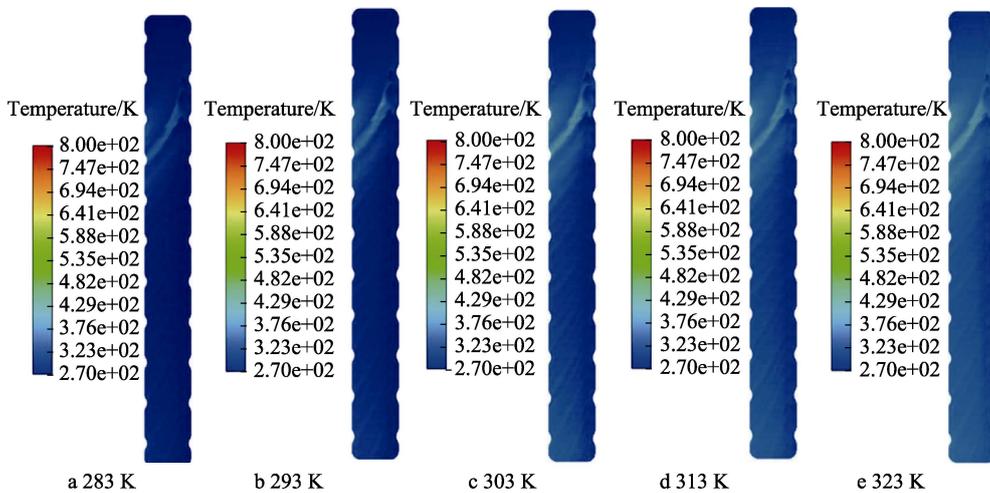


图6 不同环境温度下电磁铁表面温度分布云图

Fig.6 Surface temperature distribution of electromagnet under different ambient temperature

332.6、343.2、353.8、364.3 K。可以看出,环境温度增加每 10 K,电磁铁平均温度相应地增加大约 10 K,呈近似线性关系增加。由图 7b 可以看出,环境温度较低时,环境温度变化对电磁铁表面最高温度的影响比较显著,随着环境温度升高,对电磁铁表面最高温度的影响逐渐变缓。比较图 5 与图 7 可以看出,环境温度对电磁铁散热性能的影响要小于真空度对电磁铁的影响。

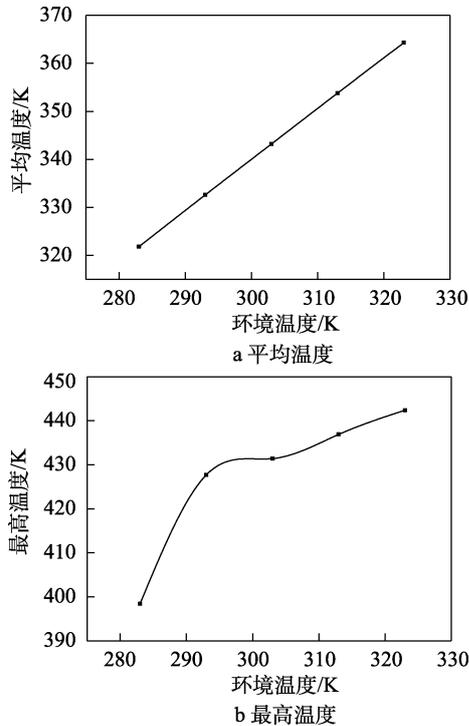


图 7 电磁铁表面平均温度和最高温度随环境温度的变化曲线

Fig.7 Curve of average (a) and maximum (b) surface temperature of electromagnet with ambient temperature

3.3 不同湍流模型结果对比

速度为 600 km/h,真空度为 60 kPa,环境温度为 303 K,湍流模型分别为 Realizable $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型时的电磁铁表面温度分布如图 8 所示。由图 8 可以看

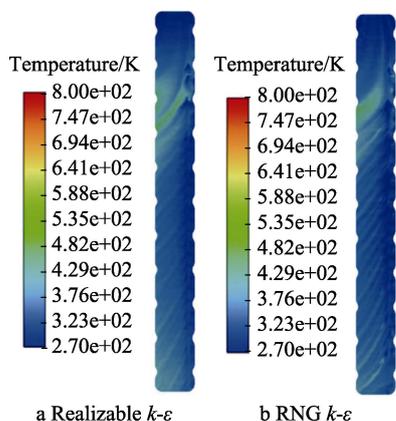


图 8 不同湍流模型电磁铁表面温度分布云图

Fig.8 Surface temperature distribution of electromagnet under different turbulence models

出,2种湍流模型下形成局部高温区的位置基本相同,均在第 3 块和第 4 块电磁铁之间,但 Realizable 湍流模型形成的高温区比 RNG 湍流模型形成的高温区稍宽。2 种湍流模型电磁铁表面的平均温度分别是 372.4、364.7 K,Realizable 湍流模型的电磁铁表面平均温度相较 RNG 湍流模型高 7.7 K。

4 结论

本文通过对真空管道磁浮列车稳定运行时的电磁铁温度场进行仿真,研究了电磁铁温度场随真空度及环境温度变化的规律,得到以下结论:

1) 当列车在环境温度为 303 K 的真空管道中以 600 km/h 速度运行时,电磁铁温度随真空度的增大而升高。当真空度超过 60 kPa 时,电磁铁温度会快速升高。

2) 当真空管道内环境温度升高时,电磁铁表面平均温度随环境温度的升高,以近似线性的关系升高。在设计真空管道列车时,需考虑夏季恶劣高温条件以及列车在管道中产生的气动热对电磁铁散热性能的影响。

3) 湍流模型分别为 Realizable $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型时,电磁铁温度场分布基本相同,但 Realizable 湍流模型的电磁铁表面平均温度比 RNG 湍流模型高 7.7 K。

参考文献:

- [1] 张耀平. ETT: 处在科技前沿的下一代运输方式[J]. 综合运输, 2004, 26(3): 15-19.
ZHANG Yao-ping. ETT: Next Generation Transportation Mode at the Forefront of Science and Technology[J]. Comprehensive Transportation, 2004, 26(3): 15-19.
- [2] 邓自刚, 张勇, 王博, 等. 真空管道运输系统发展现状及展望[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(5): 1063-1072.
DENG Zi-gang, ZHANG Yong, WANG Bo, et al. Present Situation and Prospect of Evacuated Tube Transportation System[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(5): 1063-1072.
- [3] 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.
SHEN Zhi-yun. On Developing High-Speed Evacuated Tube Transportation in China[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(2): 133-137.
- [4] OSTER D, KUMADA M, ZHANG Yao-ping. Evacuated Tube Transport Technologies (ET3)Tm: A Maximum Value Global Transportation Network for Passengers and Cargo[J]. Journal of Modern Transportation, 2011, 19(1): 42-50.
- [5] 金茂菁, 黄玲. 超高速真空管道交通技术发展现状与趋势[J]. 科技中国, 2018(3): 13-15.
JIN Mao-jing, HUANG Ling. Development Status and

- Trend of Ultra-High Speed Vacuum Pipeline Transportation Technology[J]. China Scitechnology Business, 2018(3): 13-15.
- [6] 汤友富. 超级高铁发展趋势及关键问题分析[J]. 铁道建筑技术, 2019(4): 1-4.
TANG You-fu. Research on the Development Trend and Analysis of Key Problems of Hyperloop[J]. Railway Construction Technology, 2019(4): 1-4.
- [7] 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.
LIU Jia-li, ZHANG Ji-ye, ZHANG Wei-hua. Simulation of Noise Source for High Speed Train in Evacuated Tube[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33(10): 1026-1031.
- [8] 周艳, 刘海龙, 刘英杰, 等. 真空管道交通系统超音速状态下熵层的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(8): 775-780.
ZHOU Yan, LIU Hai-long, LIU Ying-jie, et al. Simulation of Entropy Layer in Evacuated Tube Transport at Supersonic Speed[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(8): 775-780.
- [9] 沈通, 马志文, 杜晓洁, 等. 世界高速磁悬浮铁路发展现状与趋势分析[J]. 中国铁路, 2020(11): 94-99.
SHEN Tong, MA Zhi-wen, DU Xiao-jie, et al. Development Status and Trend Analysis of High Speed Maglev Railways Worldwide[J]. China Railway, 2020(11): 94-99.
- [10] 刘加利, 张继业, 张卫华. 真空管道高速列车气动阻力及系统参数设计[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(1): 10-15.
LIU Jia-li, ZHANG Ji-ye, ZHANG Wei-hua. Impacts of Pressure, Blockage-Ratio and Speed on Aerodynamic Drag-Force of High-Speed Trains[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(1): 10-15.
- [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.
LIU Jia-li, ZHANG Ji-ye, ZHANG Wei-hua. Analysis of Aerodynamic Characteristics of High-Speed Trains in the Evacuated Tube[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22): 137-143.
- [12] 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.
ZHOU Xiao, ZHANG Dian-ye, ZHANG Yao-ping. 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.
- [13] 周晓, 张耀平, 姚应峰. 真空管道中高速列车空气阻力数值仿真[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(6): 1626-1628.
ZHOU Xiao, ZHANG Yao-ping, YAO Ying-feng. Numerical Simulation on the Aerodynamic Drag of High-Speed Train in Evacuated Tube[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(6): 1626-1628.
- [14] 周鹏, 李田, 张继业, 等. 真空管道超级列车气动热效应[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 190-199.
ZHOU Peng, LI Tian, ZHANG Ji-ye, et al. Aerothermal Effect Generated by Hyper Train in the Evacuated Tube[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 190-199.
- [15] BAO Shi-jie, HU Xiao, WANG Ju-kun, et al. Numerical Study on the Influence of Initial Ambient Temperature on the Aerodynamic Heating in the Tube Train System[J]. Advance in Aerodynamic, 2020, 2(1): 1-18.
- [16] 张克锐, 李庆领, 王伟伟, 等. 真空管道高速列车气动噪声研究[J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(11): 950-957.
ZHANG Ke-ru, LI Qing-ling, WANG Chuan-wei, et al. Aerodynamic Noises of Vacuum Tube Transportation: A Simulation and Theoretical Study[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2019, 39(11): 950-957.
- [17] 刘少克. 磁浮列车用悬浮电磁铁温度场三维建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(5): 1118-1122.
LIU Shao-ke. 3D Modeling and Simulation of Temperature Field for Suspension Electromagnet of Maglev Vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(5): 1118-1122.
- [18] 殷乃睿, 刘洪武, 陈琳, 等. 基于流体仿真软件对电磁铁的温升分析[J]. 低压电器, 2013(12): 8-11.
YIN Nai-ru, LIU Hong-wu, CHEN Lin, et al. Electromagnetic Temperature Raise Simulation by Using Fluent Software[J]. Low Voltage Apparatus, 2013(12): 8-11.
- [19] 倪章松, 刘森云, 王桥, 等. 3m×2m 结冰风洞试验技术研究进展[J]. 实验流体力学, 2019, 33(6): 46-53.
NI Zhang-song, LIU Sen-yun, WANG Qiao, et al. Research Progress of Test Technologies for 3m×2m Icing Wind Tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2019, 33(6): 46-53.
- [20] 张耀平, 于晓东. 真空管道运输安全问题成因分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2006, 4(3): 57-63.
ZHANG Yao-ping, YU Xiao-dong. On the Safety of Evacuated Tube Transportation[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2006, 4(3): 57-63.
- [21] 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.
HUANG Zun-di, LIANG Xi-feng, CHANG Ning. Analysis on Simulation Algorithm for Train Outflow Field of Vacuum Pipeline Traffic[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(6): 1244-1250.

责任编辑: 刘世忠