

真空管道磁浮列车救援动力学仿真分析

陈绪勇^{1,2*} 赵立峰¹ 马家庆¹ 刘元森¹ 赵勇¹

(1. 西南交通大学超导与新能源研究开发中心超导与磁悬浮技术教育部重点实验室 成都 610031;

2. 北京新立机械有限责任公司 北京 100039)

Dynamics Simulation of Rescuing of Magnetic-Levitation Train Running in Evacuated Tube

ChenXuyong^{1,2*} Zhao Lifeng¹ Ma Jiaqing¹ Liu Yuansen¹ Zhao Yong¹

(1. Key Laboratory of Magnetic Levitation Technologies and Maglev Trains Ministry of Education of China Superconductivity and New Energy R&D Center, Southwest Jiaotong University Chengdu 610031 China; 2. Beijing XinLi Machinery Co. Ltd Beijing 100039 China)

Abstract We addressed the issue of rescuing the magnetic-levitation (maglev) train running at high speed in the evacuated tube when serious accidents should originate from either train-brake failure or building-up of pressure in the pipeline. The arresting of the maglev train was physically modeled empirically approximated and mathematically simulated with software package MATLAB. The impacts of the major factors involved such as the arresting displacement arresting force initial speed of the maglev train the safe distance of the adjacent gates blockage ratio and pressure on the rescue were simulated. In case of the train brake failure the arresting force arresting distance and initial speed were optimized; whereas in case of the pressure building-up the distance between adjacent gates pipeline pressure and pipe blocking were optimized too. We suggest that the simulation be of much technological interest for the future transportation of the maglev train.

Keywords Evacuatedtube transportation, Maglev train, Arresting force, Evacuated tube gate

摘要 未来真空管道磁浮列车设计速度将在 100 ~ 300 m/s, 对于如此高速运行的列车系统, 其救援方案必须完善, 否则将会留下安全隐患造成重大的人员伤亡和严重的经济损失。而在诸救援中列车制动失效和管道失压将是未来真空磁浮列车安全运行首要研究的因素。本文以牛顿第二定律为依据, 通过对分析模型得到的基本关系方程的推导、求解, 从而推导出列车在拦阻索减速制动过程中, 其拦阻位移、拦阻力和列车初速度三者之间的基本关系式, 同时也推导出管道失压过程中, 列车安全运行所需相邻闸门之间距离、管道阻塞比和真空度三者之间的关系式。在 MATLAB 环境下对以上关系式进行仿真分析, 我们得到制动失效时拦阻力、列车初速度和拦阻位移三者之间的优化值; 同时也得到管道失压时相邻真空闸门之间距离、管道真空度和管道阻塞比三者之间的优化值。以上仿真优化值将为真空管道列车系统设计提供理论依据。

关键词 真空管道运输 磁浮列车 拦阻力 真空管道闸门

中图分类号: TB71⁺¹ 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1672-7126.2013.11.09

随着社会的进步、生活节奏的加快, 人们对于出行和物流配送时间要求逐步提高。步入 21 世纪以来世界高速交通发展迅速, 但是航运、铁路、水运和公路运输终会遇到自己的发展瓶颈, 而在此之前真空管道运输 (Evacuated Tube Transportation) 作为一

种构想曾被提出, 这主要由于真空管道列车有如下优势: 高速、阻力小、噪音小、安全和能耗低等^[1-6]。

近年来对于真空管道列车国内有些研究, 而国外比较少, 但本文主要偏于对于真空管道列车空气动力学研究: 周^[7-8] 主要集中阐述真空管道列车

收稿日期: 2012-12-26

基金项目: 国家磁约束核聚变能研究专项资助项目 (2011GB112001); 国际合作项目 (S2013ZR0595); 国家自然科学基金资助项目 51271155; 国家自然科学基金资助项目 (51271155); 中央高校基本科研业务费资助项目 (SWJTU11ZT16; SWJTU11ZT315); 四川省科技计划资助项目 (2011JY0031; 2011JY0130)

* 联系人: Tel: 18612438143; E-mail: xyc2312@sina.com

速度在 200 m/s 运行于真空管道压强 1000 Pa 环境下的列车空气动力学问题; 张^[9] 主要阐述真空管道列车速度从 50 ~ 300 m/s 运行于真空管道压强从 10 ~ 10000 Pa 环境下的列车空气动力学问题; 文献 [10] 主要阐述不同流线型列车的头车尾车外形对于真空管道磁浮列车空气阻力的影响; 以上文均未涉及真空管道的救援研究。文献 [11 - 12] 从真空管道列车碰撞、管道失压及管道系统失效阐述了真空管道运输安全, 但并未提出具体的解决措施; 虽然文献 [13] 提出了真空管道列车涡流制动和制动磨损板来应急, 但仅仅给出抽象的方案。而对于运行中的真空管道列车最大的危害在于速度过大时制动系统失效和管道失压, 从而造成重大的人员伤亡和管道损坏, 甚至车毁人亡。本文借助于现今在航空母舰舰载机的拦截技术应用用于真空管道列车制动失效时的拦截, 通过对拦截时列车的动力学方程的 MATLAB 分析得到真空管道列车拦截过程中拦阻索拦截力、磁浮列车初速度和拦截位移三者之间的优化值, 并在 MATLAB 环境下绘出了不同拦阻力下的速度拦阻位移关系曲线和一定初速度下不同拦阻力下拦阻位移关系曲线, 从而得到一定拦阻力下列车初速度越大拦截位移增大但增大趋势逐渐减小, 一定初速度下拦阻力越大拦阻位移不断减小, 但减小率趋势逐步减小; 虽然文章 [12] 从维持管道压强角度给出了真空阀门的建议值, 但本文从管道失压时救援角度分析得出了比较优化的真空管道相邻闸门距离, 这对于维持平时管道压强和列车救援都有一定的指导意义。

1 模型分析

1.1 真空管道磁浮列车拦阻和救援系统示意图

如图 1 所示拦阻系统三维示意图, 考虑到管道内部面积和建设成本, 拦阻发射装置对称安装在管道出口外侧(二者纵向距离为 15 m), 此装置主要是在磁浮列车刹车失效时在管道外对列车进行有效拦截。

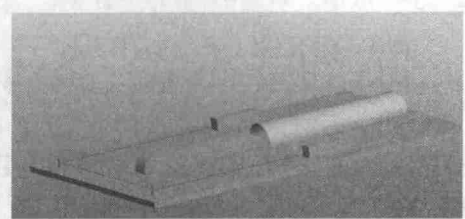


图 1 真空管道磁浮列车拦阻三维示意图

Fig. 1 A three-dimension schematic diagram of the arresting system of maglev in the evacuated tube

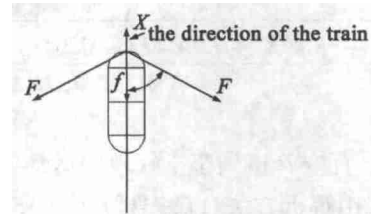


图 2 真空管道磁浮列车拦阻平面受力分析示意图

Fig. 2 The schematic diagram of arresting a maglev

图 3 为真空管道磁浮列车运行救援示意图, 管道在进气口外安装有压力传感器目的是检测管内压力达到大气压时关闭进气口, 管道两端为自动闸门示意图^[18]。

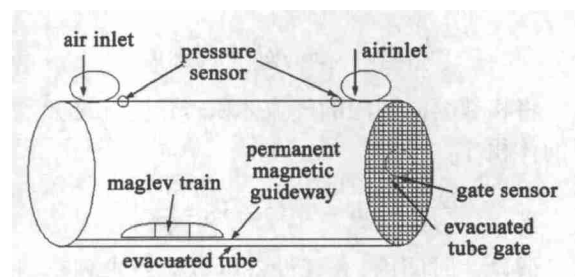


图 3 真空管道列车空气气囊救援示意图

Fig. 3 Air balloon schematic diagram of rescuing a maglev

1.2 真空管道磁浮列车动力学分析

1.2.1 真空管道磁浮列车拦阻系统受力分析

由图 2 可知真空管道磁浮列车拦阻时受力如下式

动力学基本方程有^[14]

$$\frac{d(Mv)}{dt} = -(f + 2F_x) \quad (1)$$

式中, M 为列车重量 $M = 20000 \text{ kg}$ f 为空气阻力, F_x 为网绳拉力 F 在 X 轴上的分力其表达式为 $F_x = F \frac{X}{\sqrt{X^2 + L^2}}$ f 为空气阻力 $f = -\frac{1}{2} C_x \rho S_0 \left(\frac{dx}{dt}\right)^2$, X 为拦阻时磁浮列车运动方向水平位移, L 为拦阻绳单侧长度如图 2 所示, C_x 为空气阻力系数, 只与物体表面结构有关, 为一般常数由文献 [15 - 17] 其值可取 1.4。 ρ 为空气密度, S_0 为列车正投影面积。由式 (1) 可得其为非线性方程, 由于空气阻力相对于拦阻力而言比较小, 为此以 $f = -\frac{1}{2} C C_x \rho S_0 V_0^2$ 代

替 $f = -\frac{1}{2} C_x \rho S_0 \left(\frac{dx}{dt}\right)^2$, C 取 0.9。

解式 (1) 可得

$$V = \sqrt{\frac{-4F \sqrt{X^2 + L^2} + 4FL - 0.9C_x \rho S_0 V_0^2 X}{M}} + V_0^2 \quad (2)$$

1.2.2 真空管道列车空气救援运动分析

采用解析方法,以磁悬浮列车作为质点为研究对象,对磁悬浮列车进行运动学及力学分析,为了减少充气时间,在每个闸门口附近安装6个自动进气闸口,以时间 t 为过渡变量。

充气过程任意 t 时刻,磁悬浮列车运动学方程^[18]

$$Ma = (p_0 - p) S_0 - f \quad (3)$$

根据伯努利定理对于无黏性流体可确定气体速率 μ

$$\frac{1}{2} \rho u^2 = \rho gh \quad \rho gh = p_0 - p_1 \quad (4)$$

将相邻两闸门间的气体体积转化为标准大气压下的体积 V_0

$$\frac{p_0 V_0}{T} = nR = \frac{p_1 V_1}{T} \Rightarrow V_0 = \frac{p_1}{p_0} V_1$$

假设 t 时间内,充气设备可以对所求列车与封闭阀门之间的气体充气完毕

$$utS_1 = [(1 - \varepsilon)L - v_0 t]S \quad (5)$$

为了确保磁悬浮列车安全的运营,必须有

$$y(t) < v_0 t + \frac{1}{2} a_0 t^2 < L \quad (6)$$

对于以上各式: M 为列车重量, a 为管道失压进气过程中列车的加速度, p_0 为标准大气压强, p_1 为真空管道压强, S_0 为列车横截面积, ρ_1 为真空管道内部气体密度且 $\rho_1 = \varepsilon \rho$, p 为启动应急充气 t 时刻之后管道压强,且 $p_1 < p < p_0$; 真空管道横截面积为 S , 真空管道阻塞比为 $\delta = s_0/s$, 管道内部真空度为 $\varepsilon = p/p_0$, S_1 为应急进气口面积。

对于每个进气口设置压强阈值为标准大气压,当管道压强逐渐增加至设置的阀压后,充气结束,由于空气阻力的存在,此后列车做变减速运动,直至停止,如果停不下来可以用上述的拦截系统拦截。

解式(4)得在一个标准大气压下对于无粘性气体其进入真空管道速率可达 394 m/s。但由于空气的粘滞性以及进气过程中形成的湍流效应,因此假定真空管道充气的平均速度为 $u = 150$ m/s。

解式(5)、式(6),求得一个关于 L 的不等式,设 $\beta = S_0/S$ 解得

$$L < \frac{2 \left(\frac{6u\beta S_1}{S_0} + \varepsilon v_0 \right) \left(\frac{6u\beta S_1}{S_0} + v_0 \right)}{a_0 (1 - \varepsilon)^2} \quad (7)$$

从上式可以知道 L 值的大小不仅与初始速度 v_0 以及应急充气速度 u 有关,还与应急充气面积 S_1 和管道横截面积 S 之比有关。

2 磁浮列车拦阻和救援 MATLAB 仿真分析

2.1 不同拦阻力下磁浮列车拦阻位移比较

图4为式(2)在相同初速度 $v_0 = 200$ m/s 时不同拦阻力下的拦阻位移,由图可知随着拦阻力的增加,拦阻位移逐步减少;拦阻力从 $2 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$ N 时,拦阻位移分别为 640, 400, 280, 230, 190 m, 即拦阻位移减少率为 37.5%, 30%, 17.9%, 17.4%, 可知仅仅增加拦阻力并不能总是最大可能的提高拦阻位移的减少率,另外大的拦阻力对拦阻索的材料特性也有很高的要求,比较小的拦阻力会增加对磁浮导轨的建设长度要求,而从车站的建设来说不能为了磁浮轨道的建设长度而增加车站的建造面积,因此从经济角度和材料方面考虑,初步把磁浮拦阻系统的拦阻力设定为 6×10^5 N, 此力为磁浮列车总重的 30 多倍,相对舰载机的分析此是可行的,此时对应的拦阻位移大概为 280 m, 然而刚开始拦阻时拦阻力还未发挥作用,以舰载机的拦阻系统分析可知一般拦阻索开始发挥作用在 1 s 以内^[19-20], 为此在初速度 $V_0 = 200$ m/s 时未来真空管道车站的站外磁浮轨道长度可选在 500 m, 这相对刘^[18]磁浮列车在 $v_0 = 200$ m/s 拦阻位移 1200 m 的精度大有提高,且可以进一步减少车站建设成本。

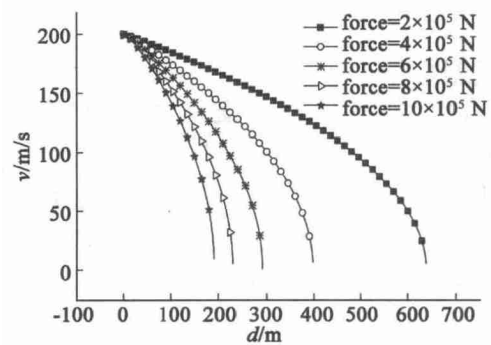


图4 不同拦阻力下拦阻位移分析

Fig. 4 Arresting displacement with different arresting forces

2.2 相同拦阻力下不同初速度时磁浮列车拦阻位移比较

图5为式(2)在相同拦阻力 $F = 6 \times 10^5$ N 下不同初速度下的拦阻位移,初速度分别为 100, 150, 200, 250, 300, 时拦阻位移分别为 90, 170, 280, 410,

530 m, 拦阻位移增加为 88.9%, 64.7%, 46.6%, 29.3% 可得一定拦阻力下磁浮列车初速度的增加 拦停位移减少越来越困难 因此从运行安全和拦停效果来看建议将来磁浮列车运行速度选择在 200 m/s。

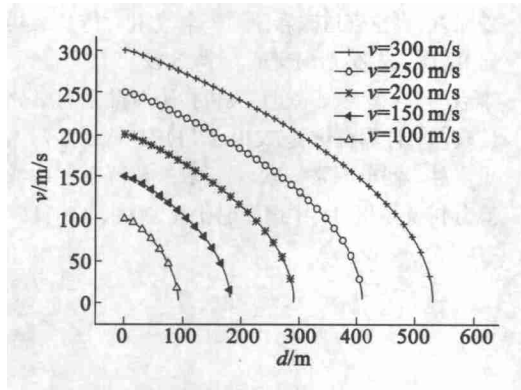


图5 相同拦阻力下不同初速度时磁浮列车拦阻位移比较
Fig. 5 The relationship between the initial velocity and the arresting displacement under the same arresting force

2.3 不同阻塞比下相邻闸门距离与管道压强曲线比较

在式(7)基础上得到图6, 可得在相同的阻塞比下相邻闸门间距离随着管道压强的增加其值也不断增加, 并且当压强在 20000 Pa 以内时相邻闸门距离增加比较缓慢, 20000 ~ 40000 Pa 时其值增加比较快, 40000 ~ 50000 Pa 增加趋势更加明显; 在一定的管道压强下, 随着阻塞比增大相邻闸门距离也不断增大, 从救援角度管道压强不能设置太小, 不然会增加管道闸门建设的费用, 也提高了对管道密闭性的要求, 而从空气动力学角度管道压强也不能设置过大, 不然就失去真空磁浮列车的优势, 增加运行过程的耗能。结合文献[6, 10]以及图6从救援和空气动力学

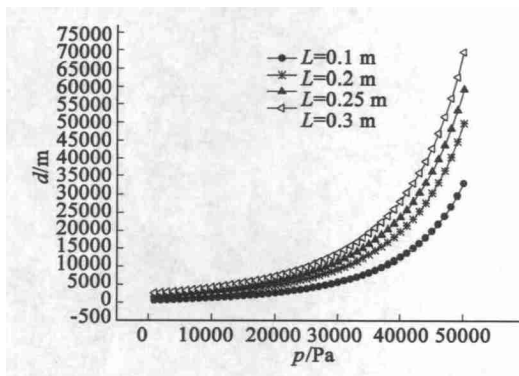


图6 不同阻塞比下相邻闸门距离与管道压强曲线
Fig. 6 The relationship between the distance of adjacent gates and the pressure at different blockages

力学角度建议将来真空管道压强选择在 10000 Pa 左右, 对应阻塞比为 0.25 的情况下相邻闸门距离为 4000 m。

3 结论

(1) 在一定的拦阻力下拦阻位移随着磁浮列车的初速度的增加其值不断增大, 而在一定的初速度下随着拦阻力的增加拦阻位移不断减小, 但从分析曲线结果来看, 随着拦阻力增大而拦阻位移减小率在下降, 为此综合拦阻索材料性质、磁浮轨道建设和经济效益来看, 初步选择拦阻索拉力在 6×10^5 N 左右, 磁浮列车运营速度设置在 200 m/s;

(2) 从管道失压救援角度并不能为了减小磁浮列车运行阻力而一味的降低管道真空度, 也不能为了救援而去增加管道真空度, 这样会增大磁浮列车运行阻力, 为此必须从维持管道压强、阻塞比、降低磁浮列车运行阻力和管道救援四者之间为真空管道相邻闸门之间距离寻找一个优化区间, 为将来真空管道磁浮列车的经济运营提供依据, 为此初步选择管道阻塞比选择在 0.25, 管道压强选择 10000 Pa 的环境。

参 考 文 献

- [1] 张耀平, 梅绍祖, 曾学贵. ETT - 引领 21 世纪的高速运输[J]. 世界科技研究与发展, 2002, 24(2): 60 - 64
- [2] <http://www.et3.com>, [2004 - 05]
- [3] Daryl Oster, Crystal River, Fla. Evacuated Tube Transportation [P]. United States: 5950543, 1999 - 9 - 14
- [4] Oster Daryl, Kumada Masayuki, Zhang Yaoping. Evacuated Tube Transport Technologies (ET3) tm: a Maximum Value Global Transportation Network for Passengers and Cargo [J]. Journal of Modern Transportation, 2011, 19(3): 42 - 50
- [5] 张耀平. 真空管道运输在未来物流体系中的角色与定位[J]. 物流科技, 2011, 34(10): 6 - 8
- [6] 钱七虎. 地下磁悬浮交通设计研究的若干问题[J]. 隧道建设, 2011, 31(2): 155 - 160
- [7] 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
- [8] 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
- [9] Zhang Yaoping. Numerical Simulation and Analysis of Aerodynamic Drag on a Subsonic Train in Evacuated Tube Transportation [J]. Journal of Modern Transportation

- tion 2012 20(1):42-50
- [10] Chen Xuyong ,Zhao Lifeng ,Ma Jiaqing ,et al. Aerodynamic Simulation of Evacuated Tube Maglev Trains With Different Streamlined Designs [J]. Journal of Modern Transportation 2012 20(2):115-120
- [11] 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
- [12] 张耀平. 真空管道运输 - 真空产业发展的新机遇 [J]. 真空 2006 43(2):56-59
- [13] 于晓东. 真空管道运输系统危险因素辨识及评价 [D]. 成都:西南交通大学 2006
- [14] 余晓军,高翔,钟民军. 蒸汽弹射器的动力学仿真研究 [J]. 船海工程 2005 (3):1-3
- [15] 李守华. 磁悬浮列车若干空气动力学问题的数值研究 [D]. 兰州:兰州大学 2006
- [16] 陈锐林,曾庆元,向俊,等. 高速列车不同头部形状的气动性能研究 [J]. 湖南科技大学学报(自然科学版) 2009 24(1):45-48
- [17] Joseph ASchetz. 高速列车空气动力学 [J]. 力学进展, 2003 33(3):404-423
- [18] 刘元森. 真空管道磁悬浮列车空气阻力仿真及其救援研究 [D]. 成都:西南交通大学 2012
- [19] 李启明,冯蕴雯,于立明. 飞机拦阻着陆动力学分析与仿真 [J]. 计算机仿真 2010 27(1):27-31
- [20] 黄胜,孟祥印,常欣. 航母舰载机降落制动滑跑距离分析及预报 [J]. 中国舰船研究 2009 4(2):11-14