International Journal of Mechanics Research 力学研究, 2021, 10(4), 294-304
Published Online December 2021 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/ijm
https://doi.org/10.12677/ijm.2021.104029

Hans汉斯

基于乘客压力舒适性的单线高速磁浮交通隧道净空面积初步研究

杜迎春[1]，张芯茹[1]，李　奎[2]，梅元贵[1*]

[1]兰州交通大学甘肃省轨道交通力学应用工程实验室，甘肃 兰州
[2]中铁二院工程集团有限责任公司科学技术研究院，四川 成都

收稿日期：2021年11月16日；录用日期：2021年12月21日；发布日期：2021年12月31日

摘　要

高速磁浮列车通过隧道时会引起剧烈的压力波动，带来乘客耳感舒适性和车体气动疲劳等问题，加大隧道净空面积是显著降低压力波动的基本措施，但也会带来建设成本问题。本文采用一维可压缩非定常不等熵流动模型广义黎曼变量特征线数值模拟压力波的源代码程序，研究了时速600公里速度等级下单列车通过隧道引起的压力波特征，得出了以不同时间间隔舒适性标准为指标的最不利隧道长度，确定了列车动态气密性对最不利隧道长度的影响规律，提出了满足国内外不同舒适性标准的单线隧道净空面积建议值，为补充国内相关技术标准提供了技术依据。

关键词

高速磁浮列车，隧道净空面积，压力波，压力舒适性标准，一维流动模型，特征线法

Preliminary Study on Clearance Area of Single-Line High-Speed Maglev Tunnel Based on Passenger Pressure Comfort

Yingchun Du[1], Xinru Zhang[1], Kui Li[2], Yuangui Mei[1*]

[1]Gansu Province Engineering Laboratory of Rail Transit Mechanics Application, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu
[2]China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Nov. 16th, 2021; accepted: Dec. 21st, 2021; published: Dec. 31st, 2021

*通讯作者。

文章引用: 杜迎春, 张芯茹, 李奎, 梅元贵. 基于乘客压力舒适性的单线高速磁浮交通隧道净空面积初步研究[J]. 力学研究, 2021, 10(4): 294-304. DOI: 10.12677/ijm.2021.104029

Abstract

High-speed maglev trains will cause severe pressure fluctuations when passing through tunnels, causing problems such as passenger comfort and car body aerodynamic fatigue. Enlarging the tunnel clearance area is a basic measure to significantly reduce pressure fluctuations, but it will also bring about construction cost issues. In this paper, a one-dimensional compressible unsteady non-isentropic flow model is used to simulate the pressure wave by the source code of the characteristic line of the generalized Riemann variable. The characteristics of the pressure wave caused by a single train passing through a tunnel at a speed of 600 kilometers per hour are studied. The critical tunnel length with different time interval comfort standards as indicators is obtained. The influence of the dynamic airtightness of the train on the critical tunnel length is determined. The proposed value of clearance area for single-track tunnels that meets different comfort standards at home and abroad is proposed. This provides a technical basis for supplementing relevant domestic technical standards.

Keywords

High-Speed Maglev, Tunnel Clearance Area, Pressure Wave, Pressure Comfort Standard, One-Dimensional Compressible Flow Model, Method of Characteristics

1. 引言

高速磁浮可以填补航空(800 km/h 至 1000 km/h)与高铁客运(最高 350 km/h)之间的空白[1]。从经典的列车空气动力学问题看，高速磁浮隧道空气动力学现象和研究方法与高速轮轨相同[2]，但由于两者运行速度及系统间的差异，磁浮列车隧道压力波问题相比轮轨系统具有特殊性。目前还没有完全相同速度等级的高速磁浮列车和高速轮轨列车隧道压力波等问题的对比，仅从隧道压力波产生机理方面分析了两者间的差异。目前，有关轮轨高速隧道压力波及隧道净空面积等方面的研究大多以时速 350 公里等级及以下速度范围的线路隧道开展研究的[3] [4] [5]。其中，UIC779-11 [6]指出了确定轮轨高速隧道净空面积主要满足的条件是依据车内压力舒适性的控制条件。针对时速 600 公里速度等级磁浮隧道空气动力学问题及其工程对策亟需开展研究。我国已经开展了高速磁浮交通隧道空气动力学的相关研究。依据我国当前高速轨道车辆车体设计和制造水平，研究不同速度等级高速磁浮交通隧道净空面积值是十分必要的。

国外较早研究了高速磁浮交通隧道空气动力学问题。在日本，菅沢正浩等较为系统介绍了 MLX01 试验列车的空气动力学性能和实车实验的结果[7]。高橋和也[8]和本田敦[9]研究了日本磁浮列车通过隧道时诱发的微气压波及隧道入口端缓冲结构的减缓效果。山崎幹男等采用实车测试及 CFD 两种方法相结合的方式研究了 MX01 列车以 500 km/h 通过隧道时隧道内压力波动[10]。齋藤実俊采用模型实验及数值模拟方法系统研究了高速磁浮列车通过隧道时初始压缩波和微气压波的关系[11]。木川田一弥进行了浅水槽试验的研究，在实际列车速度 500 km/h，阻塞比 0.130 时，单列车通过 1445 m 隧道运行时洞内中央处最大正压值已达 9 kPa，交会达到 18 kPa [12]。对于日本超导磁浮的“U”型轨道隧道而言，最大设计速度 550 km/h 下的双线隧道净空面积为 74 m^2 [13]。在德国，Th. Tielkes 对基于 ICE 的轮轨高速和 TR09 型磁

浮列车空气动力学问题进行了较为系统的对比分析，给出了隧道净空面积推荐值及车体动态气密指数[2]。

国内张光鹏等曾系统探讨了车辆气密性能对隧道净空面积的影响规律[14]。张兆杰等在对 Fluent 进行二次开发的基础上，对磁浮列车隧道压力波动进行了三维数值模拟，但其研究的速度等级只有 250 km/h [15]。2019 年国家铁路局颁布了“磁浮铁路技术标准”(试行) (TB 10630-2019)，其中提出了时速 300、400、500 和 600 公里等速度等级单双线的隧道最小净空面积建议值[16]，但是该标准缺乏详细的具体车体气密性和隧道参数下的压力波特征和不同舒适性标准对应关系，特别是在 TB 10630-2019 标准中 § 5.5.3 采用了更严格的舒适性标准，存在要求更大隧道净空面积的可能。

本文基于一维可压缩非定常不等熵流动模型的特征线方法得出列车通过隧道时产生的压力波的基础上[17]，针对独立隧道，研究单列磁浮列车通过隧道引起的车外压力波的特征，研究了隧道长度和气密性参数对车内压力舒适性控制指标的影响，提出了满足国内外不同舒适性标准的时速 600 公里速度等级下的单线磁浮隧道净空面积建议值，进一步完善补充了《磁浮铁路技术标准(试行)》中隧道净空面积相关部分，为高速磁浮隧道建设提供基础的数据支撑。

2. 数值计算方法

2.1. 车外压力计算方法

列车进出隧道的整个过程中，会使隧道内产生三维可压缩非定常的紊流流动，由于隧道长度远大于隧道水利直径，列车长度也远大于隧道壁面与列车壁面所形成的环状空间，此时可将三维流动转化为一维流动。本文采用一维可压缩非定常不等熵流动模型的特征线数值模拟方法，该方法满足工程需求。具体详述见[17]。

2.2. 车内压力计算方法

图 1 表示在车外压力作用下考虑车体、车窗、卫生间、空调装置、车门和连接车辆的风挡等实际因素下的车内外压力相互作用的简化物理模型。该模型中，将车辆看成具有弹性壁面和任意泄漏孔的封闭容器。在计算车内压力时，假设车体为刚性，忽略车体进排风影响，车内压力计算公式为：

$$p_i = p_o\left(1-\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) \tag{1}$$

式中：p_i 为车内当前时刻和前一时刻的压差，p_o 为车外车内压差，单位为 kPa；t 为时间，τ 为动态时间常数，单位为 s。

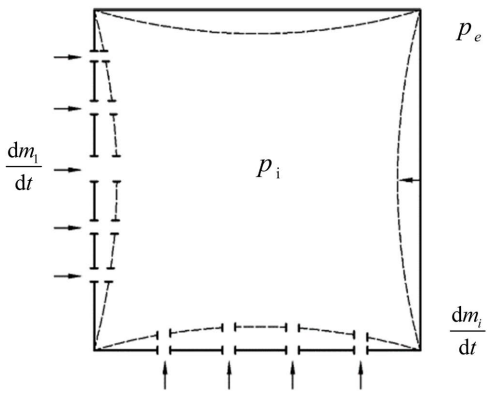


Figure 1. In-car pressure calculation model
图 1. 车内压力计算模型

3. 基于舒适性的磁浮隧道最小净空面积的研究方法

本文从压力舒适性标准的角度研究高速磁浮隧道净空面积的选择问题。根据计算分析，当隧道净空面积改变时，基于车内压力的最不利隧道长度值不变。本文计算分析时，先以目前设计单位考虑的磁浮单线隧道净空面积为基准，利用一维可压缩非定常不等熵模型[17] [18]，计算高速磁浮列车车外压力；再利用时间常数模型[19]计算出不同时间常数下的车内压力，统计分析出基于车内压力的最不利隧道长度，最后将最不利隧道下不同净空面积的车内压力与压力舒适度标准对比分析，得出最终的隧道净空面积建议值。具体过程如图 2 所示。

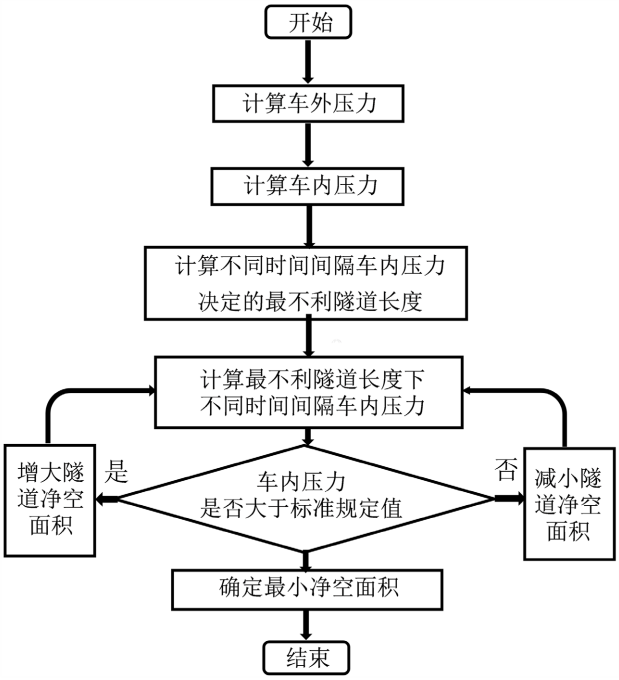


Figure 2. Research method of the minimum clearance area of maglev tunnel
图 2. 磁浮隧道最小净空面积的研究方法

4. 乘客压力舒适性标准选取

欧洲铁路研究所(ERRI)分别从医学和车内司乘人员舒适感 2 个角度制定了瞬变压力容许值。2002 年国际铁路联盟(UIC)采用 1 s、3 s 和 10 s 内最大容许瞬变压力变化作为评价车内舒适性的标准(本文后文简称为 UIC1)；到 2005 年，增加了 60 s 的压力变化限制[20] (本文后文简称为 UIC2)；2019 年，国家铁路局颁布了《磁浮铁路技术标准(试行)》，§5.5.3 规定了单车和交会时车内最大容许瞬变压力(后称为“磁浮铁路技术标准”) [16]。本文采用上述 4 个复合型标准，具体内容见表 1。

Table 1. Pressure comfort standard
表 1. 压力舒适性标准

时间间隔/s	德国/kPa	UIC1/kPa	UIC2/kPa	磁浮铁路技术标准/kPa	
				单车	交会
1	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.3	/
3	≤0.8	≤0.8	≤0.8	≤0.8	≤1.25

Continued

10	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0	/
30	≤1.5	/	/	/	/
60	/	/	≤2.0	/	/
任意时间	≤2.0	/	/	≤1.5	≤1.5

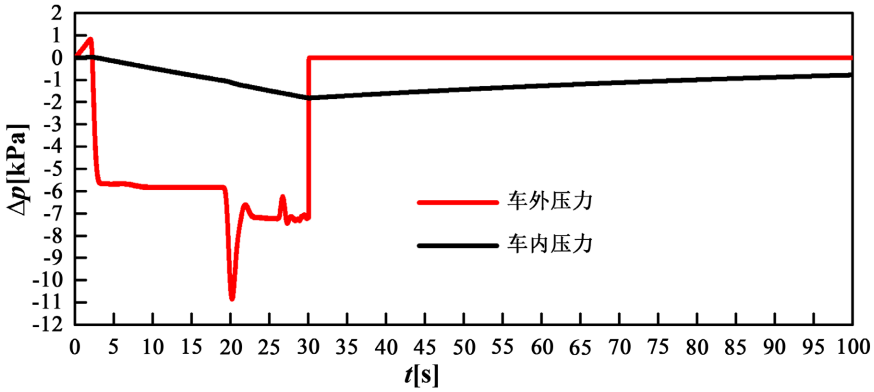
5. 计算结果和分析

5.1. 列车和隧道参数

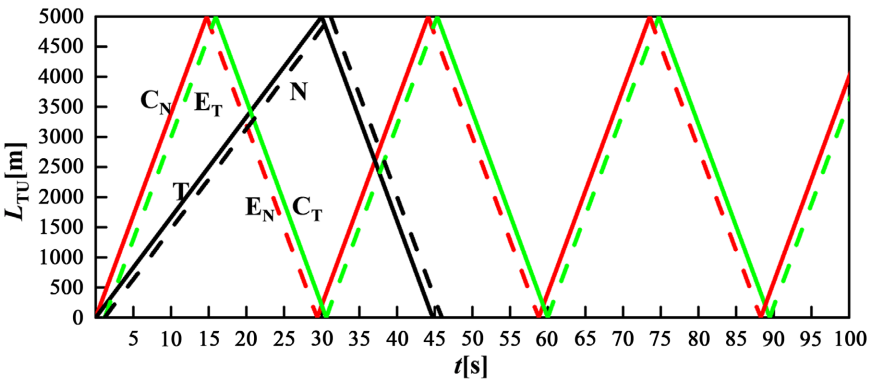
本文采用国内已下线的时速 600 公里磁浮试验车为研究对象。采用 Mc + 6M + Mc 形式的 8 编组，头尾车长 28.0 m，中间车长 24.67 m，合计 204.6 m。计算时车长圆整为 200 m；列车横截面积 12.80 m^2；时间常数值选取 83 s、90 s、100 s、110 s、120 s 和 125 s。隧道净空面积基准值选取单线 100 m^2，隧道长度选取 0.4 km 至 20 km，隧道壁面摩擦系数 0.005。

5.2. 高速磁浮单线隧道压力波基本特征

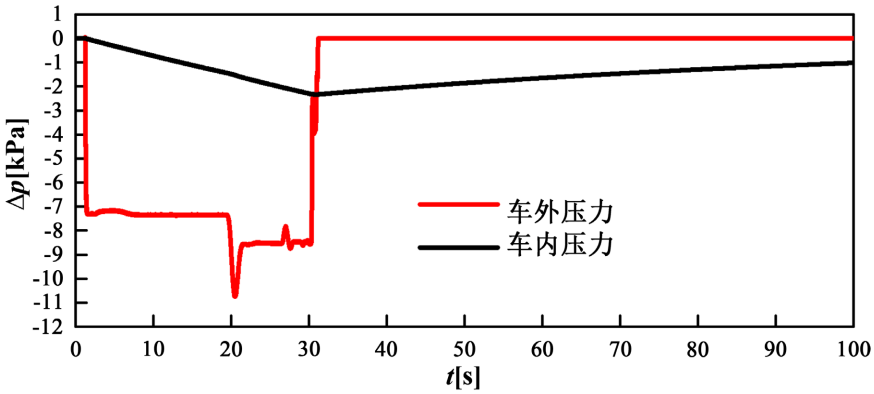
图 3 表示 8 编组磁浮单列列车以速度 600 km/h 通过长 5000 m、净空面积 100 m^2 的隧道时，磁浮列车隧道压力波形成机理；其中，列车时间常数值为 83 s，车头车尾轨迹线用 N 和 T 表示，C 和 E 分别表示压缩波和膨胀波，下标 N 和 T 分别表示车头和车尾诱发的压力波。由于壁面的限制和空气的可压缩性，车头进入隧道产生的压缩波和车尾产生的膨胀波传播至隧道端口反射回来形成“异号波”，致使车内外压力产生波动。由于列车速度达到 600km/h，车外压力波动较剧烈，最大负压值已达到−11.44 kPa。



(a) 头车车内外压力波动



(b) 磁浮列车运行轨迹图



(c) 尾车车内外压力波动

Figure 3. The formation mechanism of pressure wave in maglev train tunnel
图 3. 磁浮列车隧道压力波形成机理

5.3. 不同车厢车内外压力变化的基本特性

图 4 表示了列车过隧道时不同车厢车内外压力分布特性。其中，列车和隧道参数与图 3 相同。不同车厢车外压力波动均比较剧烈。头车进入隧道，与隧道壁面等摩擦使得测点压力升高，出现列车通过隧道全过程内最大正压值，随着车厢位置越靠后，最大正压值逐渐减小，尾车几乎为零；遇到头车进入隧道产生的压缩波传播到隧道出口端反射的膨胀波，车外压力下降，出现列车通过隧道全过程内最大负压值，第 5 车厢最大负压值最大，已达到 11.44 kPa；不同车厢车内压力波动类似，由于列车气密性较高，延迟车外压力传播进车内的时间，车内波动较缓慢，且列车车内压力恢复至大气压需要更长时间。

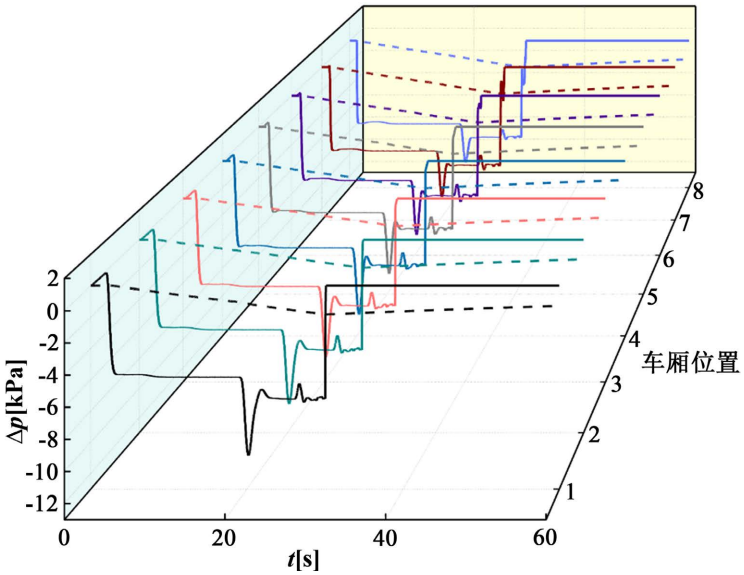


Figure 4. Pressure distribution characteristics inside and outside different car
图 4. 不同车厢车内外压力分布特性

5.4. 基于舒适性标准的最不利隧道长度

必须指出，最不利隧道长度在数学上是特定隧道长度具体值，但从压力波形成机理和具体数值等工程角度定义，应是在压力最值相差较小的隧道长度变化范围值。选取头尾两列车厢为例进行研究。

图 5 表示单列车以 600 km/h 的速度通过净空面积 100 m^2 的隧道时，隧道长度对车内不同时间间隔内

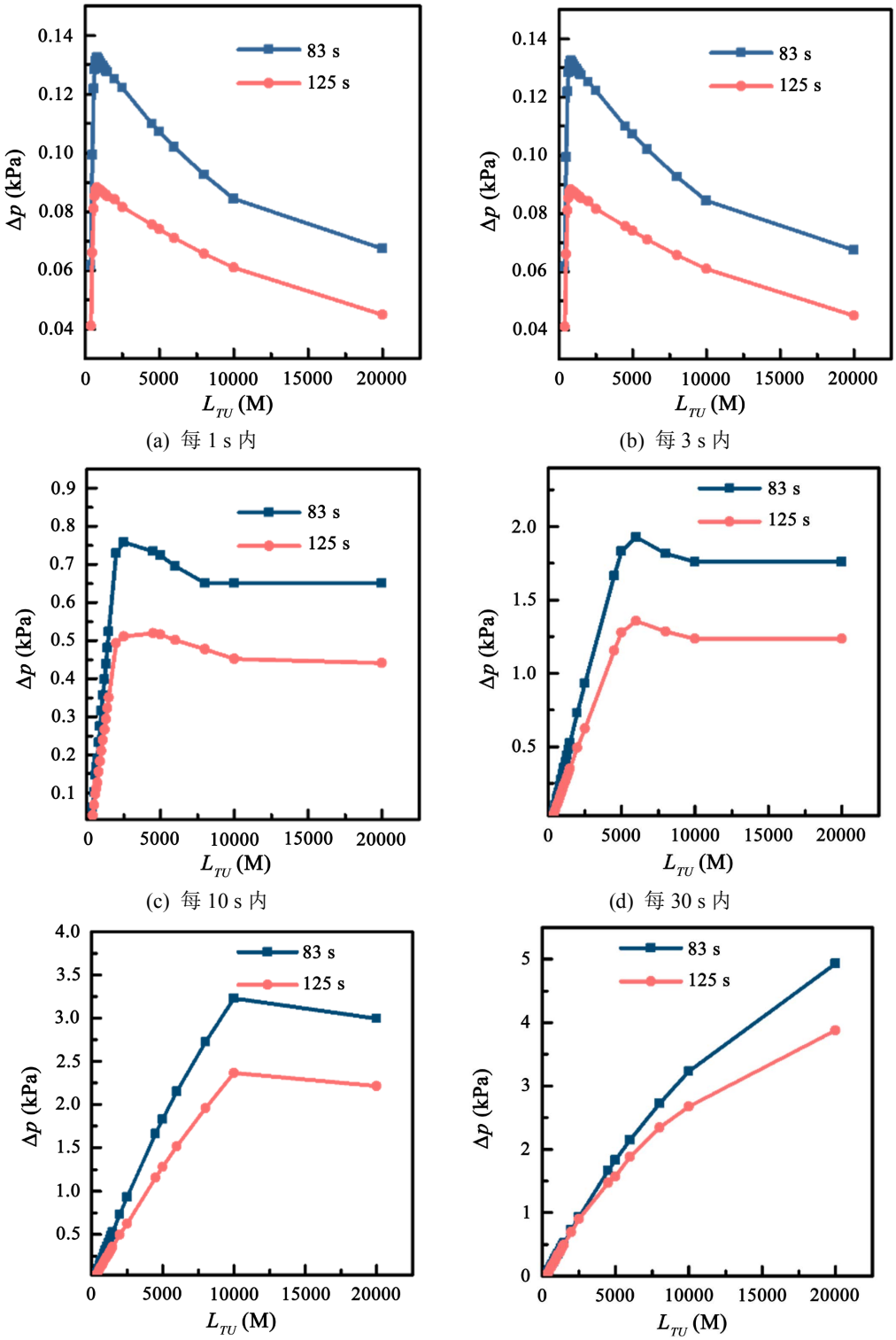
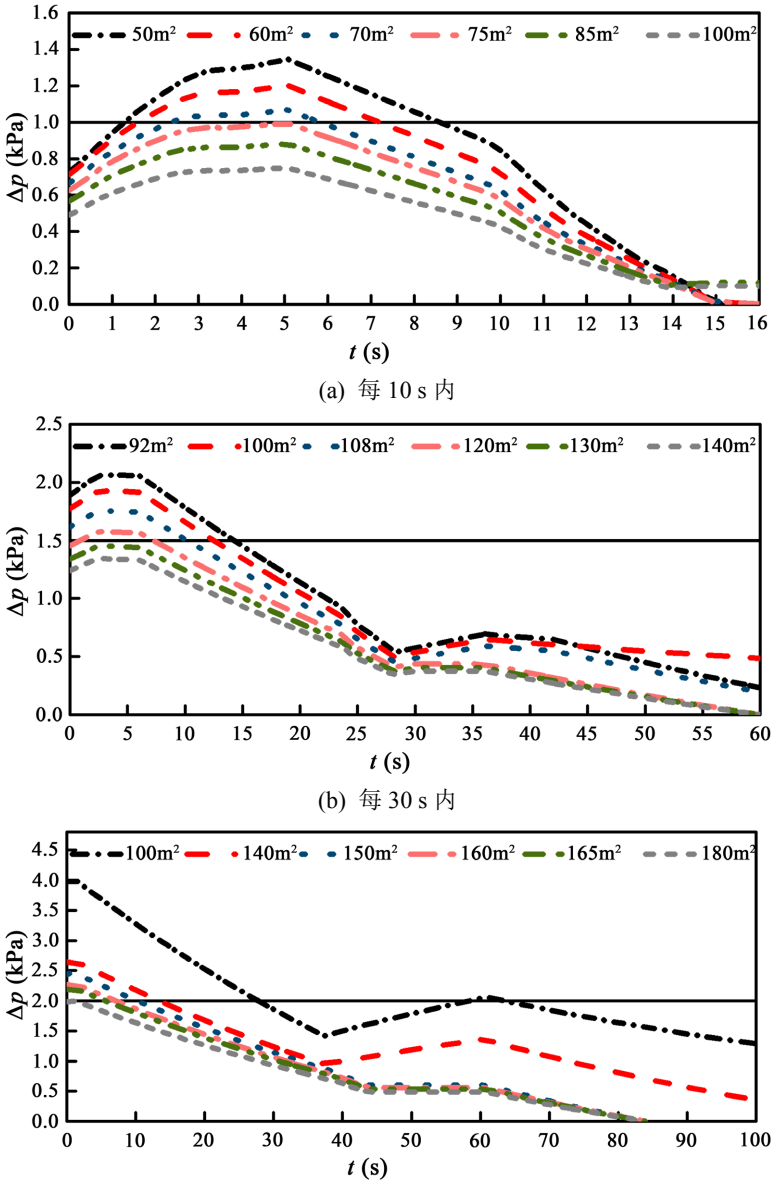


Figure 5. The influence of the length of the tunnel on the maximum pressure change in different time intervals in the headcar
图 5. 隧道长度对头车车内不同时间间隔内最大压力变化量的影响

压力最大值的影响。其中，时间常数为 83 s 和 125 s。随着隧道长度的增大(<20 km)，不同时间常数值头车每 1 s 内、3 s 内和每 10 s 内压力曲线类似，呈现出先增大、后减小；不同时间间隔车内压力最大值，对应一个基于车内不同时间间隔内压力的最不利隧道长度；头尾车每 30 s 内和 60 s 内压力曲线类似，呈现出先增大、后减小、再增大的趋势；头尾车通过隧道全过程内车内压力呈现出一直增大的趋势。

5.5. 隧道净空面积和舒适性、时间常数的关系

时速 600 公里磁浮单列车头车通过车内每 10 s、30 s 和 60 s 内最不利隧道长度隧道时，净空面积对头车车内压力变化的影响，如图 6 所示。其中，时间常数为 83 s。随着隧道净空面积的增大，每 10s、30s 和 60 s 内头尾车的车内压力最大变化量减小，反之亦然。



(a) 每 10 s 内

(b) 每 30 s 内

(c) 每 60 s 内

Figure 6. The influence of the tunnel clearance area on the pressure inside the head car
图 6. 隧道净空面积对头车车内压力的影响

图 7 表示了时间常数对不同时间间隔内隧道最小净空面积建议值的影响。每 10 s、每 30 s、每 60 s 和任意时刻的最小隧道净空面积值均随着时间常数的增大而线性减小。

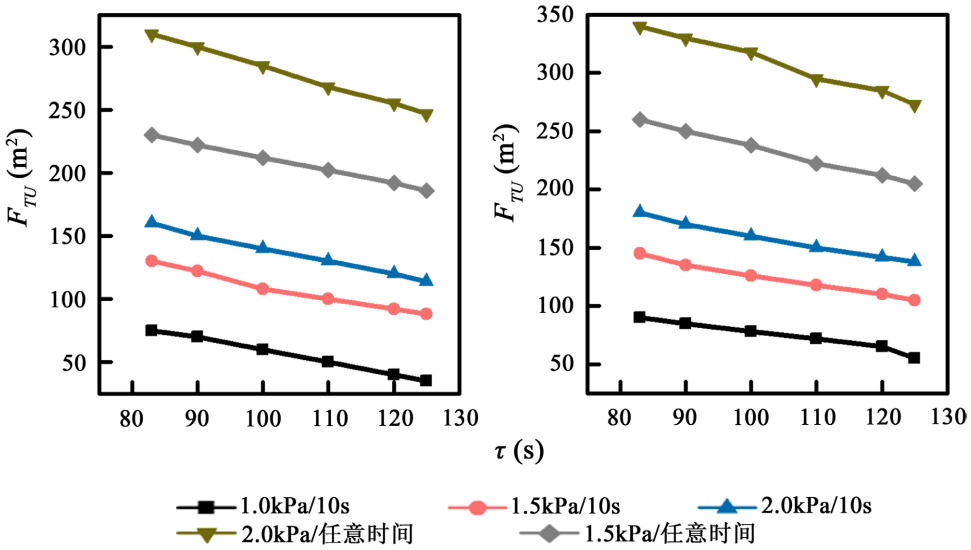


Figure 7. The influence of the time constant on the recommended minimum clearance area
图 7. 时间常数对最小净空面积建议值的影响

图 8 表示时间常数对满足不同压力舒适性标准的最小隧道净空面积的影响。本文研究所选的 4 个压力舒适性标准中《磁浮铁路技术标准》最为严格，德国舒适性标准次之，UIC1 最宽松。德国舒适性标准规定≤2.0 kPa/任意时刻，《磁浮铁路技术标准》中规定≤1.5 kPa/任意时刻，瞬变压力仅相差 0.5 kPa，而满足两个标准的净空面积建议值相差 68 m² ($\tau = 125$ s)，由此可知，时间常数较大时，车内压力增加的幅度远远小于隧道净空面积增加的幅度；时间常数对最小净空面积建议值的影响规律呈线性，如下式所示：

$$F_{\mathrm{TU}} = \mathrm{a} - \mathrm{b} \cdot \tau \tag{2}$$

其中：F_{TU} 为隧道净空面积建议值，单位为 m²，τ 为时间常数，a 和 b 为常数，具体数值见表 2。

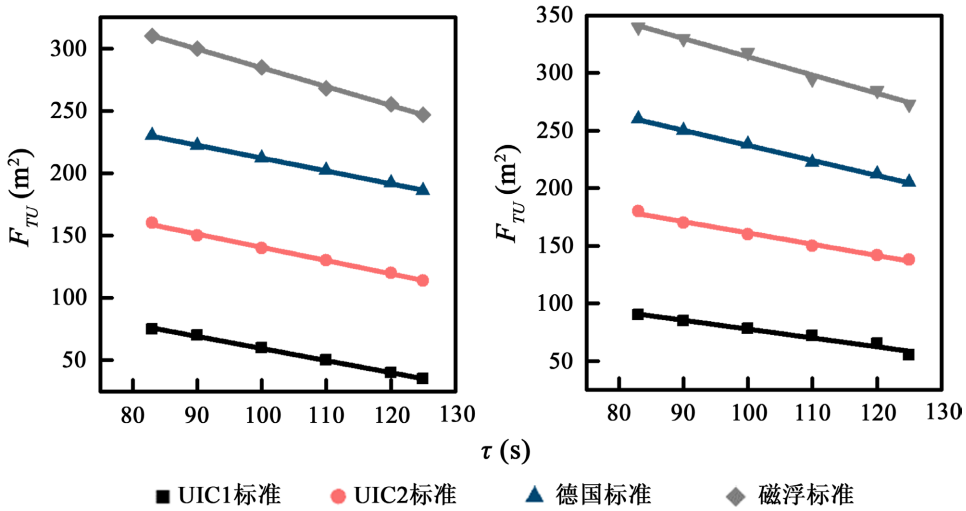


Figure 8. The influence of the time constant on the recommended values of the minimum clearance area of different standards
图 8. 时间常数对不同标准最小净空面积建议值的影响

Table 2. Different standard a/b value table
表 2. 不同标准 a/b 取值表

不同标准		UIC1	UIC2	德国标准	磁浮标准
a/b	头车	161.2	232.8	306.02	288.25
	尾车	201.4	264.6	280.8	297.5
R^2			0.999		

6. 结论

1) 时速 600 公里高速磁浮列车车外压力波动剧烈，在 100 m^2 隧道净空面积下车外最大负压达到 −11.44 kPa；

2) 根据隧道长度对车内压力的影响规律，不同时间间隔车内压力最大值，对应一个基于车内不同时间间隔内压力的最不利隧道长度；且该最不利隧道长度基本不受车体时间常数值的影响；

3) 根据《磁浮铁路技术标准(试行》、德国舒适性标准、UIC (2005 年第二版)和 UIC (2002 年第一版) 4 个复合型压力舒适性标准，考虑到目前磁浮标准中提出的列车时间常数值，提出了基于压力舒适性标准的时速 600 公里高速磁浮单线隧道净空面积建议值；

4) 德国舒适性标准和《磁浮铁路技术标准(试行)》中规定任意时刻的瞬变压力仅相差 0.5 kPa，而满足标准的隧道净空面积建议值却相差 68 m^2，由此可知，车内瞬变压力增大的幅度远远小于隧道净空面积增大的幅度。

致　谢

感谢张芯茹、李奎为本论文作出的巨大贡献。

基金项目

中铁二院工程集团有限责任公司项目(科 2019-022)。

参考文献

[1] 金鑫. 磁浮交通技术的发展及应用现状简述[J]. 四川建筑, 2018, 38(5): 73-75.

[2] Tielkes, T. (2006) Aerodynamic Aspects of Maglev Systems. *MAGLEV*'2006: *The* 19*th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*, Dresden, 13-15 September 2006, 1-9.

[3] Klaver, E.C. and Kassies, E. (2000) Dimensioning of Tunnels for Passenger Comfort in Netherlands. *Proceedings of the* 10*th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Boston, 1-3 November 2000, 737-755.

[4] Kwon, H.B. (2015) A Study on the Minimum Cross-Sectional Area of High-Speed Railway Tunnel Satisfying Passenger Ear Discomfort Criteria. *Journal of Computational Fluids Engineering*, **20**, 62-69. https://doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.3.62

[5] 邓杰, 余南阳, 赵海恒. 京沪高速铁路隧道有效断面适应性研究[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(3):66-70.

[6] UIC (2005) Determination of Railway Tunnel Cross-Sectional Areas on the Basis of Aerodynamic Considerations. International Union of Railways, UIC Codex 779-11.

[7] 菅沢正浩, 保坂史郎, 岩本孝昌, 等. 山梨リニア実験線新型車両の走行試験結果概要[J]. 鉄道技術連合シンポジウム(j-rail)講演論文集, 2003(10): 305-308.

[8] 高橋和也, 本田敦, 野澤剛二郎, 等. 超高速鉄道トンネルにおける入口側円型緩衝工の微気圧波低減効果[J]. 土木学会論文集 A1(構造·地震工学), 2015, 71(2): 167-172.

[9] 本田敦, 高橋和也, 野澤剛二郎, 等. 超高速鉄道のトンネル内圧縮波伝播性状と出口側緩衝工による微気圧波低減効果[J]. 土木学会論文集 A1(構造·地震工学), 2015, 71(1): 128-138.

[10] 山崎幹男, 若原敏裕, 永長隆昭, 等. 超高速鉄道トンネル内に生じる圧力変動評価[J]. 土木学会論文集, 2003(738): 171-189.

[11] 齋藤実俊. 高速鉄道におけるトンネル内圧力変動とトンネル微気圧波に関する研究[D]: [博士論文]. 大阪, 大阪大学大学院工学研究科, 2015.

[12] 木川田一弥, 森井宜治. 超高速列車がトンネル内を走行する際の圧力変動に関する実験的研究[J]. 土木学会論文集, 1993(458): 137-145.

[13] 马积薪. 山梨磁浮铁路试验线的隧道建设[J]. 隧道译丛(1), 1994(1): 1-13.

[14] 张光鹏, 雷波, 李琼. 磁浮列车气密性能对隧道净空面积的影响[J]. 铁道学报, 2005, 27(2): 126-129.

[15] 张兆杰, 高波, 王英学. 磁悬浮列车穿越隧道引起的压力波传播规律研究[J]. 石家庄铁道大学学报自然科学版, 2005, 18(4): 11-14.

[16] TB10630-2019 磁浮铁路技术标准(试行) [S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2019.

[17] 梅元贵. 高速铁路隧道空气动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[18] 史宪明, 吴剑, 万晓燕, 陈洋宏. 基于车内瞬变压力变化的 400km/h 高速铁路隧道净空面积探讨[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(7): 1118-1124.

[19] Diepen, P. 德国密封式客车[J]. 国外铁道车辆, 1999, 36(3): 14-22.

[20] UIC (2002) Measures to Ensure the Technical Compatibility of High-Speed Trains. UIC Codex 660.