DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.008

中低速磁浮列车双线隧道交会时的气动特性研究

焦齐柱[1,2]，张铭举[1,2]，熊小慧[3,4]，王凯文[3,4]，陈　波[3,4]
（1.中铁第四勘察设计院集团有限公司，湖北 武汉 430063；
2.水下隧道技术国家地方联合工程研究中心，湖北 武汉 430063；
3.中南大学 轨道交通安全教育部重点实验室，湖南 长沙 410075；
4.中南大学 轨道交通列车安全保障技术国地联合工程研究中心，湖南 长沙 410075）

摘　要：为探明速度140 km/h的中低速磁浮列车在双线隧道内交会时隧道壁面和车体表面压力变化情况，文章采用数值计算方法研究了车/隧不同参数对隧道壁面和车体表面气动性能的影响，并对比了不同编组长度的列车和不同隧道净空面积对列车车内压力的影响。研究结果表明，4车编组的磁浮列车在双线隧道中部交会时，隧道壁面测点的压力变化峰峰值与隧道净空面积的1.379次方成反比，车体表面压力测点的变化峰峰值与隧道净空面积的1.231次方成反比。当隧道净空面积为66.2 m^2时，在气密性指数为0.5 s条件下，8车编组列车在隧道内交会引起车内测点的3 s压力变化值相较于4车编组列车增加102.2%，而在气密性指数为8 s条件下该比例降低至50.4%。文章的研究结果可为中低速磁浮隧道工程建设提供参考依据。

关键词：磁浮列车；气动特性；双线隧道；空气动力学；数值计算

中图分类号：U237　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2024)03-0061-09

0　引言

磁浮列车作为新兴的轨道交通工具，具有噪声低、运行平稳、无脱轨风险等优点[1-2]。目前，我国商用磁浮列车分为高速和中低速两种，前者目标速度为600 km/h，后者运行速度在80~160 km/h。磁浮列车在研发过程中会遇到诸多空气动力学问题，虽然在研发时借鉴了普速铁路设计规范，但由于磁浮交通与普速铁路在钢轨踏面形式、车辆外形和阻塞比等方面存在较大的差异，完全借鉴缺乏足够的理论依据和数据支撑[3]。特别是当磁浮列车通过双线隧道时，受隧道净空面积影响会产生差异较大的压力波，影响乘客和司乘人员的乘车舒适性，因此亟须研究磁浮列车通过双线隧道时的隧道净空面积相关标准。

近年来，国内外学者对磁浮列车隧道空气动力学问题开展了系列研究。文献[4]研究了高速磁浮列车以不同速度通过隧道时列车和隧道表面压力分布特性，并总结出隧道表面压力的最大值与列车速度呈指数函数关系。文献[5]基于隧道内流动的一维可压缩非定常模型，分析了高速磁浮列车通过隧道时车外压力的变化规律。文献[6]同样采用一维可压缩非定常模型对磁浮列车隧道内运行时的车体压力载荷分布规律进行了研究，并讨论了列车速度、隧道长度等因素对车体压力载荷分布规律的影响。文献[7]为减小单线高速磁浮隧道出口微压缩波，提出了一种沿扩大净空面积、面壁面开孔率递减的新型通风隧道罩，可使距离隧道出口20 m和50 m处的微气压波最大值分别降低66.9%和40.9%。文献[8]基于三维可压缩N-S方程和k-ε湍流模型研究了600 km/h速度等级的高速磁浮列车通过单线隧道时产生的压力波对乘坐人员耳感舒适性的影响，并分析了隧道长度、隧道净空面积等因素对车内外压

基金项目：湖南省自然科学基金项目（2021JJ30849）
通信作者：陈　波，男，博士研究生，从事列车空气动力学研究；E-mail: 905369674@qq.com
引用格式：焦齐柱, 张铭举, 熊小慧, 等. 中低速磁浮列车双线隧道交会时的气动特性研究[J]. 机车电传动, 2024(3): 61-69.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.008.
Citation：JIAO Qizhu, ZHANG Mingju, XIONG Xiaohui, et al. Aerodynamic characteristics of medium-low-speed maglev trains during intersection in two-track tunnel[J]. Electric drive for locomotives,2024(3): 61-69.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.008.

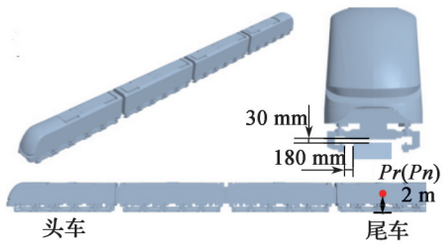
力变化的影响规律。文献[9]采用 k-ε 湍流模型分析了磁浮列车通过连续隧道时的压力波特性，对比发现列车通过长隧道时的压力大于通过短隧道。文献[10]采用 SST k-ε 湍流模型对高速磁浮列车通过净空面积 140 m^2 隧道时受到的阻力、侧向力和升力特性进行了分析。文献[11]在高速磁浮隧道顶部安装吸气设备对隧道压力波进行抽吸，结果表明吸气设备对初始压缩波和列车前方高压起到了削弱作用。文献[12]采用数值模拟方法分析了中低速磁浮列车在隧道交会时的最不利位置，结果表明列车在隧道中部等速交会时，车内外压力波动最为明显。文献[13]采用 IDDES 方法对高速磁浮列车通过隧道的滑移流峰值和瞬态尾流特性进行了分析，结果表明列车尾部后方形成的涡结构尺度更大，尾流涡在流向上的发展距离更长。文献[14]探明了不同隧道净空面积对高速磁浮列车隧道内运行时的气动效应，并以车内压力舒适性为评判标准提出了最不利隧道长度条件下的隧道最小净空面积建议。文献[15]基于三维可压缩 N-S 方程和 SST k-ω 湍流模型对中速磁浮列车驶入隧道时产生的初始三维压缩波特性进行了研究，结果表明初始压缩波沿隧道传递后转变为一维平面波。

上述文献相关学者对高速与中低速磁浮列车在隧道内运行时的压力波动特性和传播规律进行了广泛研究，并提出了减弱隧道压力波的有效方法。然而中低速磁浮列车尽管运行速度低，但由于隧道净空面积较小，其空气动力学性能变化与高速磁浮列车有所不同，目前暂未见中低速磁浮列车通过双线隧道的气动特性的相关研究报道。本文以 4 车编组和 8 车编组的 140 km/h 速度等级中低速磁浮列车为研究对象，分析了磁浮列车在净空面积为 52.0 m^2、66.2 m^2 和 72.0 m^2 的双线隧道内交会时，列车车内测点、隧道壁面测点和车体表面测点压力的变化规律，研究结果可为中低速磁浮双线隧道工程设计提供指导。

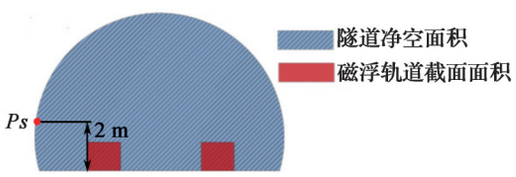
1 数值方法

1.1 计算模型

本文将分别讨论速度 140 km/h 的不同编组长度磁浮列车在不同净空面积隧道交会时的空气动力学性能。其中，不同编组长度列车包括 4 车编组和 8 车编组，不同隧道净空面积包括 52.0 m^2、66.2 m^2 和 72.0 m^2；4 车编组列车长度为 63.28 m，8 车编组列车长度为 125.68 m。为便于计算，对“F”形轨道结构进行简化，保持轨道的主体尺寸不变，轨道顶面距磁浮列车悬浮架底部距离为 30 mm，轨道侧壁距悬浮架两侧的距离为 180 mm。4 车编组磁浮列车计算模型及尾车中部表面压力测点 Pr 如图 1(a)所示，并在测点 Pr 对应的车内位置布置测点 Pn。隧道净空面积为隧道面积减去磁浮轨道净空面积所得，磁浮列车车体横截面面积为 8.54 m^2，隧道为矿山法单洞双线隧道（无中隔墙），隧道净空面积示意图及隧道中部压力测点 Ps 如图 1(b)所示。



(a) 4 车编组磁浮列车模型



(b) 隧道净空面积示意图

图 1 计算模型

Fig. 1 Computational model

1.2 计算域与边界条件

磁浮列车通过隧道时的计算域如图 2 所示。从图 2(a)可以看出，计算域共包含 2 个静止空气域和 1 条隧道，静止空气域包括隧道前空气域 1 和隧道后空气域 2，空气域 1 和空气域 2 的长、宽、高均为 350 m、120 m 和 60 m。对各边界进行如下设置：空气域 1 和空气域 2 的两侧面和顶面均设置为对称边界，与隧道入口、出口接触的平面设置为固定壁面边界条件，隧道壁面采用标准壁面函数；空气域 1 的入口端面设置为静压为 0 Pa 的压力入口，空气域 2 出口端面设置为静压为 0 Pa 的压力出口。列车双线隧道交会时的最不利隧道长度为

$$L_{\mathrm{tu,crit}}=\frac{c}{2}\left(\frac{L_{\mathrm{tr1}}}{v_{\mathrm{tr1}}}+\frac{L_{\mathrm{tr2}}}{v_{\mathrm{tr2}}}\right) \tag{1}$$

式中：$L_{\mathrm{tu,crit}}$ 为列车双线隧道交会的最不利隧道长度；L_{tr1} 为第一列交会列车长度，L_{tr1} 取 8 车编组长度；L_{tr2} 为第二列交会列车长度，L_{tr2} 取 8 车编组长度；c 为音速，c=340 m/s；v_{tr1} 为第一列车运行速度，取 v_{tr1}=140 km/h；v_{tr2} 为第二列车运行速度，取 v_{tr2}=140 km/h。

通过式(1)可知，磁浮列车在双线隧道中部交会的最不利隧道长度为 1 098.8 m。考虑到后续计算车内压力变化规律时，在车外压力向车内传递的过程中，若隧道过短则会使得车内压力传递不充分，导致车内压力数值偏小，结合文献[16]中提到的速度等级 140 km/h 列车隧道运行时的隧道长度为 2 000 m，最终将本文计算域的隧道长度设置为 2 000 m。

利用滑移网格技术模拟双线隧道与磁浮列车之间的相对运动，各区域之间的数据交换通过滑移区域与空气域之间的交界面进行。每列磁浮列车均配置 1 个滑

移区域，如图2(b)和图2(c)所示。为真实模拟列车通过隧道全过程，保证列车运行至隧道时列车周围流场已充分发展，选择列车初始位置位于距隧道入口50 m处，并且为了保证外流场的完整性和准确性，滑移区域的末端超出静止区域末端600 m。

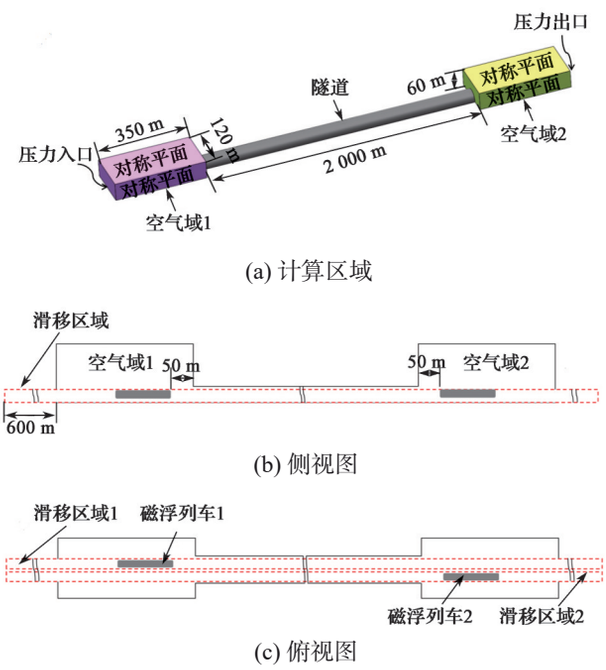


图2　计算区域示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the calculation area

1.3　网格设置

网格划分结果如图3所示，使用切割体网格单元生成器对网格进行划分，根据几何模型的比例和流场的复杂结构对网格进行合理分配，计算域的网格总数为3.4×10^8个。图3中标记*A*的矩形域是不同网格大小的加密区域，本文对网格进行3次加密处理，靠近磁浮列车车身的滑移区域的网格大小为0.2 m，并向最外侧的区域逐层增大，加密区域的网格尺寸从小到大分别为0.4 m、0.8 m和1.6 m，这样可以在保证计算精度的前提下减少无关区域的网格数量。此外，由于本文需要对车体表面压力变化规律进行分析，并且车体表面附近的法向速度梯度较大，因此在车体表面设置了8层网格边界层，边界层增长率1.2，边界层总厚度0.1 m，如图3中标记*B*所示。对于隧道壁面和轨道区域网格，由于空气的流动特性通常在靠近壁面的边界层内会发生较大的变化。因此，对隧道壁面和轨道壁面均设置多层网格边界层，以更好地模拟实际情况下的空气流动，边界层层数设置为8层，边界层增长率1.2，边界层总厚度0.1 m，如图3中标记*C*和标记*D*所示。

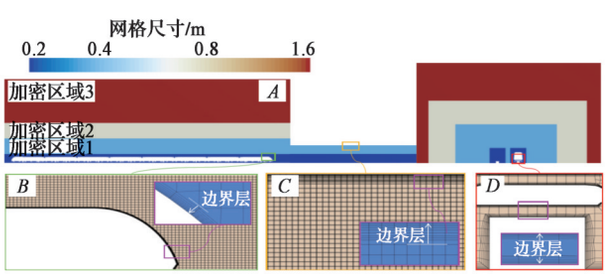


图3　计算区域网格

Fig. 3　Calculation area grid

1.4　数值求解方法

本文数值求解选取的中低速磁浮列车的运行速度为140 km/h，马赫数低于0.3，虽然空气流动属于不可压缩流动，但是磁浮列车通过隧道时引发的空气流动受到壁面限制，因而具有可压缩性。因此，本研究的数值模拟方法选择同样具有可压缩性的URANS模型，所采用的计算软件为商业软件STAR-CCM+。在该模型中，湍流模型采用SST *k*-*ε*湍流模型，“压力–速度场”的耦合则使用半隐式分离求解法（SIMPLE算法），动量方程的“对流–扩散项”采用二阶迎风格式。在时间导数方面，采用了一阶隐式方法；同时，时间步长设定为1.5×10^{-3} s，每个时间步迭代20次。

2　数值方法验证

为验证数值计算方法的可靠性，在中南大学的动模型试验装置上开展磁浮列车通过隧道时的气动特性试验。该动模型试验台的试验线路全长为164 m，隧道净空面积为0.154 m^2，双线隧道的线间距为0.25 m，隧道长度为54.762 m，列车模型为2车编组的1:20缩比磁浮列车模型。当动模型的缩比尺度为1:20，并且动模型的最低运行速度为97 km/h时，雷诺数进入自模拟区，列车的气动特性不再随雷诺数的变化而变化，能真实反映列车的气动特性[17]。本文磁浮列车运行速度为140 km/h，显然满足条件。使用建模软件建立与动模型线路长度、隧道大小、列车尺寸等数据一致的仿真模型，并对该仿真模型采用前文所述的数值求解方法进行计算，旨在建立与动模型试验相同尺度的模型，验证数值方法的有效性。

动模型试验与数值计算所得测点的压力时程变化曲线如图4所示，以及隧道中部压力测点*Ps*的压力峰值对比如表1所示。从图4和表1可以看出，动模型试验与数值计算测得的隧道中部压力变化峰值最大相对误差为2.33%，压力变化规律几乎一致，数据吻合度较高，符合TB/T 3503.4—2018《铁路应用空气动力学》标准规定[18]，因此可以认为本文采用的数值方法对于求解磁浮列车隧道空气动力学特性是有效的。根据文献[19]研究发现——隧道压力波的基本分布规律不受雷诺数的影响，该数值方法在列车全尺度条件下依旧可行。

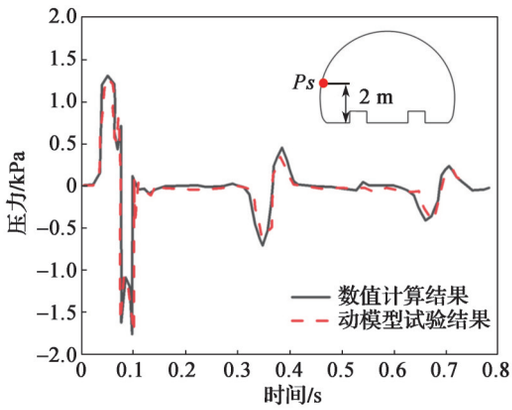


图4 不同方法下隧道中部测点*Ps*压力时程曲线

Fig. 4 Time-history curve of *Ps* pressure on measuring point in the middle section of the tunnel under different methods

表1 隧道中部测点*Ps*压力峰值对比

Table 1 Comparison of *Ps* pressure peaks at measuring points in the middle section of the tunnel Pa

测点位置	方法	压力正峰值	压力负峰值	压力幅值
隧道中部	动模型试验	1 313	−1 761	3 075
	数值计算	1 284	−1 741	3 025
	误差/%	2.21	1.14	1.63

3 结果分析与讨论

3.1 隧道壁面压力变化幅值的影响规律

3.1.1 隧道净空面积影响分析

为分析隧道净空面积对隧道壁面压力变化幅值的影响规律，对比研究了当4车编组磁浮列车在净空面积为52.0 m²、66.2 m²和72.0 m²的双线隧道内等速交会时，隧道中部压力测点*Ps*的压力随时间的变化情况（如图5所示），以及不同隧道净空面积下隧道中部测点压力正峰值、负峰值和峰峰值（如图6所示）。

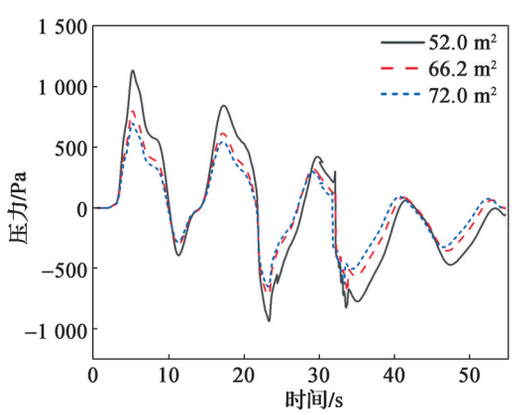


图5 不同隧道净空面积下隧道中部压力时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of pressure in the middle section of the tunnel across various tunnel clearance areas

从图5和图6可知：①当4车编组磁浮列车在隧道中部交会时，随着隧道净空面积的增大，隧道壁面压力正峰值、负峰值和峰峰值均不断减小，其中当隧道

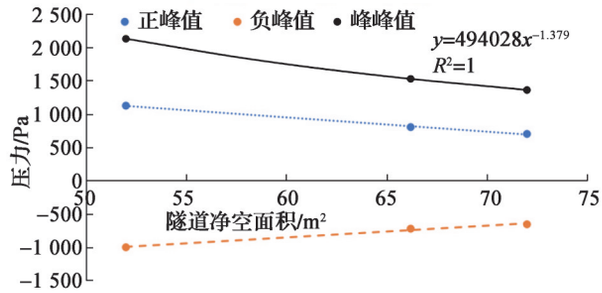


图6 不同隧道净空面积下隧道中部压力峰值变化曲线

Fig. 6 Variation curves of peak pressure in the middle section of the tunnel across various tunnel clearance areas

净空面积分别为52.0 m²、66.2 m²和72.0 m²时，对应的隧道中部压力峰峰值分别为2 126 Pa、1 525 Pa和1 357 Pa；相较于隧道净空面积为52.0 m²、66.2 m²的压力峰峰值，隧道净空面积72.0 m²的压力峰峰值分别减少36.2%和11.0%。②当4车编组磁浮列车在隧道中部交会时，隧道壁面压力峰峰值与隧道净空面积的1.379次方成反比。

3.1.2 列车编组长度影响分析

为研究磁浮列车编组长度对隧道壁面压力变化幅值的影响规律，对比研究了当4车编组和8车编组列车在净空面积为66.2 m²的双线隧道内等速交会时，隧道中部压力测点*Ps*的压力随时间的变化情况（如图7所示），以及不同列车编组长度下隧道中部压力峰值变化（如图8所示）。

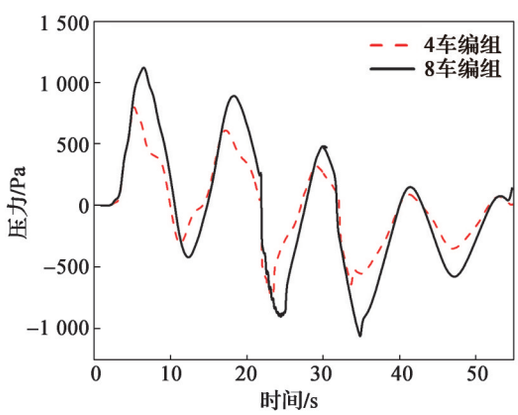


图7 不同列车编组长度下隧道中部压力时程曲线

Fig. 7 Time-history curve of pressure in the middle section of the tunnel across different train consist lengths

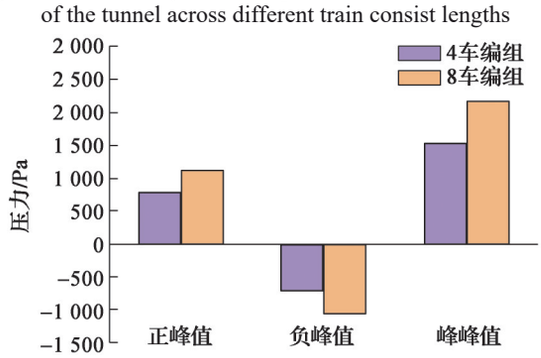


图8 不同列车编组长度下隧道中部压力峰值变化

Fig. 8 Variation curves of peak pressure in the middle section of the tunnel across different train consist lengths

从图 7 和图 8 可知：①当不同编组长度列车在隧道中部交会时，随着列车编组长度增大，隧道壁面压力峰值出现时刻有所延后，但整体趋势基本不变。②随着列车编组长度的增大，隧道壁面压力正峰值、负峰值和峰峰值均增大，其中当列车编组长度由 4 车增加为 8 车时，隧道壁面测点压力正峰值由 800 Pa 增大至 1 121 Pa，增大了 40.13%；负峰值由 −725 Pa 增大至 −1 062 Pa，幅值增大了 46.48%；峰峰值由 1 525 Pa 增大至 2 183 Pa，增大了 43.15%。这是由于 8 车编组列车相比于 4 车编组列车拥有更多的车厢，因此在隧道内交会时占用的长度更长，这会导致更大的气动干扰，从而增加车体表面和隧道壁面的压力变化峰值。

3.2　车体表面压力变化幅值的影响规律

3.2.1　隧道净空面积影响分析

为研究隧道净空面积对车体表面压力变化幅值的影响规律，对比研究了当 4 车编组磁浮列车在净空面积为 52.0 m^2、66.2 m^2 和 72.0 m^2 的双线隧道等速交会时，尾车中部压力测点 *Pr* 的压力随时间的变化情况（如图 9 所示），以及不同隧道净空面积下尾车中部压力测点 *Pr* 的压力正峰值、负峰值和峰峰值变化（如图 10 所示）。

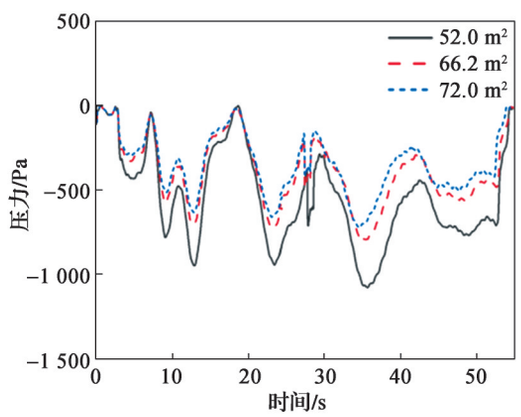


图 9　不同隧道净空面积下尾车中部压力时程曲线

Fig. 9　Time-history curve of pressure in the middle section of the tail car across various tunnel clearance areas

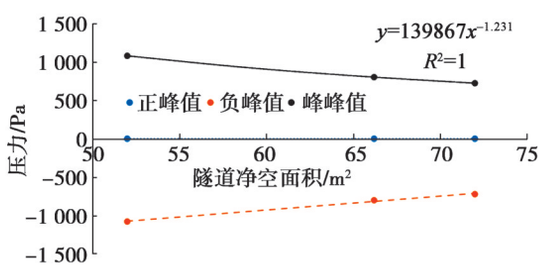


图 10　不同隧道净空面积下尾车中部压力峰值变化曲线

Fig. 10　Variation curves of peak pressure in the middle section of the tail car across various tunnel clearance areas

从图 9 和图 10 可知：①当 4 车编组列车在隧道中部交会时，随着隧道净空面积的增大，列车表面所受压力幅值逐渐减小，其中当隧道净空面积分别为 52.0 m^2、66.2 m^2 和 72.0 m^2 时，对应的车身表面最大压力峰峰值分别为 1 158 Pa、862 Pa 和 768 Pa；相较于隧道净空面积为 52.0 m^2、66.2 m^2 的压力峰峰值，隧道净空面积 72.0 m^2 的压力峰峰值分别减少 33.7%、10.9%。②4 车编组磁浮列车在隧道中部等速交会时，尾车中部测点压力变化峰峰值与隧道净空面积的 1.231 次方成反比。

3.2.2　列车编组长度影响分析

为研究列车编组长度对车体表面压力变化幅值的影响规律，分别对比研究了当 4 车编组和 8 车编组磁浮列车在净空面积为 66.2 m^2 的双线隧道中部交会时，尾车中部压力测点 *Pr* 的压力随时间的变化情况（如图 11 所示），以及不同列车编组长度下尾车中部压力测点 *Pr* 的压力正峰值、负峰值和峰峰值（如图 12 所示）。

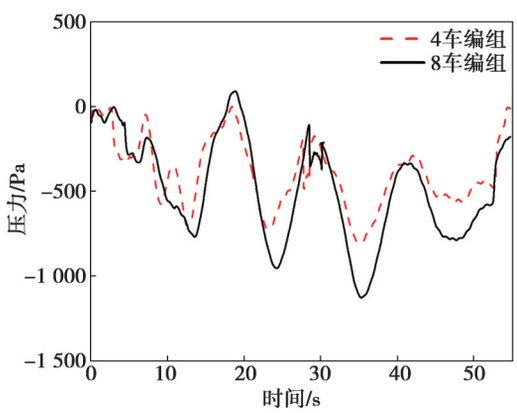


图 11　不同列车编组长度下尾车中部压力时程曲线

Fig. 11　Time-history curve of pressure in the middle section of the tail car across different train consist lengths

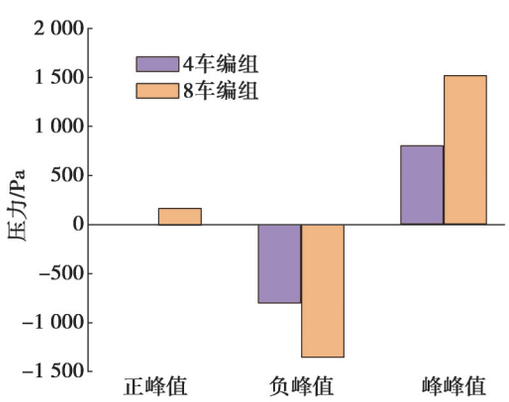


图 12　不同列车编组长度下尾车中部压力峰值变化

Fig. 12　Variation curves of peak pressure in the middle section of the tail car across different train consist lengths

从图 11 和图 12 可知：①当不同编组长度列车在隧道中部交会时，随着列车编组长度增大，列车尾车中部压力变化峰值出现时刻有所延后，但整体变化趋势基本不变。②随着编组长度的增大，车身压力的正峰值、负峰值和峰峰值均增大，其中当列车编组长度由 4 车增加为 8 车时，列车尾车中部压力正峰值由 0 Pa 增大至 164 Pa；负峰值由 −801 Pa 增大至 −1 354 Pa，幅值增加了 69.04%；峰峰值由 801 Pa 增大至 1 518 Pa，增加了

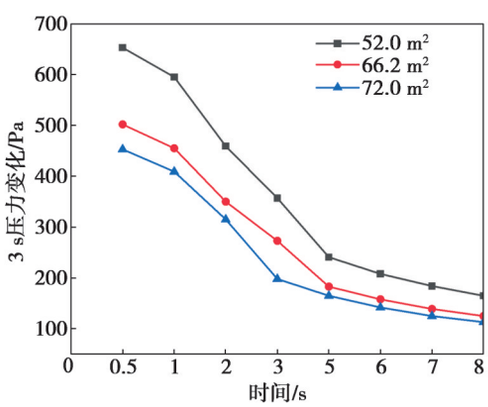
89.51%。

3.3 列车车内压力变化幅值的影响规律

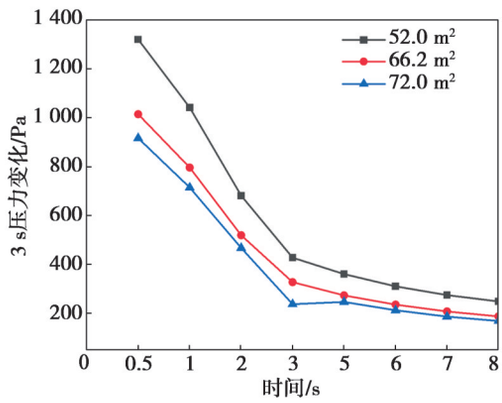
3.3.1 隧道净空面积和编组长度影响分析

为研究磁浮列车编组长度和隧道净空面积对列车车内压力变化幅值的具体影响机制，分别对比研究了当4车编组和8车编组磁浮列车在净空面积为52.0 m^2、66.2 m^2和72.0 m^2的隧道中部交会时车内3 s压力变化情况，不同条件下车内3 s压力变化情况如表2、表3和图13所示，其中不同编组长度列车通过净空面积为66.2 m^2的隧道车内3 s压力变化峰值如图13(c)所示。隧道净空面积为66.2 m^2时不同编组长度列车气密性指数对比如表4所示。

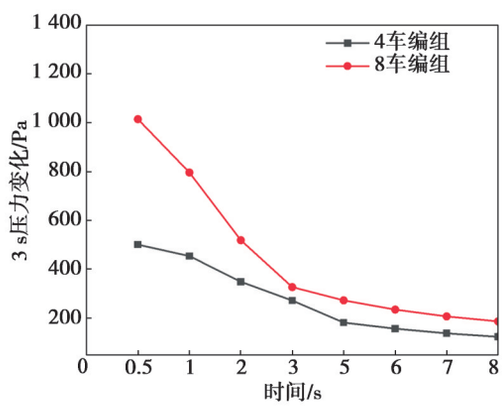
由表2~表4和图13可知：①当磁浮列车在隧道中部交会时，随着隧道净空面积的减小，不同气密性指数下4车编组与8车编组列车通过隧道时的车内测点3 s压力变化值均逐渐增大。②当隧道净空面积为66.2 m^2时，8车编组列车在隧道中部交会时车内3 s压力变化值较4车编组更大；气密性指数为0.5~3 s时的8车编组列车在隧道中部交会时车内测点3 s压力变化值较4车编组大20.1%~102.2%；气密性指数为5~8 s时的8车编组列车在隧道中部交会时车内测点3 s压力变化值较4车编组大49.4%~50.4%。



(a) 隧道净空面积对4车编组列车车内压力变化的影响



(b) 隧道净空面积对8车编组列车车内压力变化的影响



(c) 列车编组长度对车内压力变化的影响(66.2 m^2)

图13 不同条件下车内3 s压力的变化规律

Fig. 13 Variation rule of train pressure over 3 s under different conditions

3.3.2 隧道长度影响分析

为明确隧道长度对车内压力变化峰值的影响规律，对比研究了8车编组列车在净空面积分别为66.2 m^2的2 000.0 m长度隧道和1 098.8 m长度隧道的中部交会时车内测点3 s压力幅值变化规律，对比结果如表5所示。

表2 不同气密性指数下4车编组列车车内3 s压力变化峰值

Table 2 Peaks of pressure variations over 3 s inside a 4-car train with various airtightness indexes

净空面积/m^2	不同气密性指数下3 s压力变化值/Pa								阻塞比
	0.5 s	1.0 s	2.0 s	3.0 s	5.0 s	6.0 s	7.0 s	8.0 s	
52.0	653	595	459	357	241	208	184	165	0.164
66.2	502	455	350	273	183	158	139	125	0.129
72.0	453	409	315	198	165	142	125	113	0.119

表3 不同气密性指数下8车编组列车车内3 s压力变化峰值

Table 3 Peaks of pressure variations over 3 s inside a 8-car train with various airtightness indexes

净空面积/m^2	不同气密性指数下3 s压力变化值/Pa								阻塞比
	0.5 s	1.0 s	2.0 s	3.0 s	5.0 s	6.0 s	7.0 s	8.0 s	
52.0	1 321	1 042	682	428	361	311	275	249	0.164
66.2	1 015	797	520	328	274	236	208	188	0.129
72.0	917	715	468	238	247	213	187	169	0.119

表4　不同编组长度列车不同气密性指数下压力对比

Table 4　Comparison of pressure across various airtightness indexes and different train consist lengths

编组长度	不同气密性指数下3 s压力变化值/Pa								净空面积/m^2
	0.5 s	1.0 s	2.0 s	3.0 s	5.0 s	6.0 s	7.0 s	8.0 s	
4车	502	455	350	273	183	158	139	125	66.2
8车	1 015	797	520	328	274	236	208	188	66.2
误差/%	1 02.2	75.2	48.6	20.1	49.7	49.4	49.6	50.4	

表5　隧道长度对列车车内测点压力变化规律的影响

Table 5　Influence of tunnel length on pressure variations at measuring points inside train　　Pa

隧道长度/m	气密性指数							
	0.5 s	1.0 s	2.0 s	3.0 s	5.0 s	6.0 s	7.0 s	8.0 s
1 098.8	1 192	956	639	376	322	292	267	242
2 000.0	1 015	797	520	328	274	236	208	188
差值/%	17.4	19.9	22.9	14.6	17.5	23.7	28.4	28.7

由表5可知，当隧道净空面积为66.2 m^2时，8车编组磁浮列车在1 098.8 m长度隧道中部交会时车内3 s压力变化值较2 000.0 m长度隧道更大；气密性指数为0.5~3 s时的8车编组列车在1 098.8 m长度的隧道中部交会时车内测点3 s压力变化值较在2 000.0 m长度隧道中部交会增加14.6%~22.9%；气密指数为5~8 s时的8车编组列车在1 098.8 m长度的隧道中部交会时车内测点3 s压力变化值较在2 000.0 m长度隧道中部交会增加17.5%~28.7%。

4　结论

本文基于数值仿真方法分析了速度为140 km/h的中低速磁浮列车在长度为2 000 m的双线隧道内交会时的压力变化规律，通过对比不同列车编组长度和不同隧道净空面积对测点压力变化幅值的影响，得到的主要研究结论如下：

①4车编组与8车编组长度磁浮列车在隧道中部交会时，随着隧道净空面积由52 m^2增大至72 m^2，隧道壁面、车体表面和车内测点的压力变化幅值均不断减小。其中，当4车编组列车在隧道中部交会时，隧道壁面测点压力峰峰值与隧道净空面积的1.379次方成反比；车体表面测点压力峰峰值与隧道净空面积的1.231次方成反比。

②当磁浮列车在隧道中部交会时，随着列车编组长度由4车增加至8车，隧道壁面、车体表面测点的压力变化幅值均随之增大。其中，当隧道净空面积为66.2 m^2，列车编组长度由4车增加为8车时，隧道中部测点压力变化峰峰值由1 525 Pa增大至2 183 Pa，增大了43.15%，尾车中部测点压力变化峰峰值由801 Pa增大至1 518 Pa，增加了89.51%。气密性指数为0.5~3 s时的8车编组列车隧道中部交会时车内测点3 s压力变化值较4车编组大20.1%~102.2%，气密性指数为5~8 s时的8车编组列车在隧道中部交会时车内测点3 s压力变化值较4车编组大49.4%~50.4%。

参考文献：

[1] HUANG Sha, LI Zhiwei, YANG Mingzhi, et al. Aerodynamics of high-speed maglev trains passing each other in open air[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2019, 188: 151-160.

[2] 熊嘉阳, 邓自刚. 高速磁悬浮轨道交通研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 177-198.
XIONG Jiayang, DENG Zigang. Research progress of high-speed maglev rail transit[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(1): 177-198.

[3] 王超, 蒋尧, 李奎, 等. 基于乘客压力舒适性的中低速磁浮交通单线隧道净空面积研究[J]. 机车电传动, 2020(6): 80-84.
WANG Chao, JIANG Yao, LI Kui, et al. A study on the single-line tunnel clearance area of low and medium-speed magnetic levitation transportation based on passenger pressure comfort[J]. Electric drive for locomotives, 2020(6): 80-84.

[4] HAN Shuai, ZHANG Jie, XIONG Xiaohui, et al. Influence of high-speed maglev train speed on tunnel aerodynamic effects[J]. Building and environment, 2022, 223: 109460.

[5] 梅元贵, 张志超, 杜健, 等. 高速磁浮单列车通过隧道时车外压力数值模拟研究[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(6): 78-89.
MEI Yuangui, ZHANG Zhichao, DU Jian, et al. Numerical simulation study on the pressure outside the vehicle when a high-speed magnetic levitation single train passes through a tunnel[J]. China railway science, 2021, 42(6): 78-89.

[6] 张志超, 杜健, 赵汗冰, 等. 高速磁浮单线隧道车体压力载荷特征[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(1): 21-30.
ZHANG Zhichao, DU Jian, ZHAO Hanbing, et al. Pressure load characteristics of high-speed magnetic levitation single-line tunnel body[J]. Journal of railway science and engineering, 2021, 18(1): 21-30.

[7] ZHANG Jie, GUO Bingjun, WANG Yuge, et al. A novel vented tunnel hood with decreasing open ratio to mitigate micro-pressure wave emitted at high-speed maglev tunnel exit[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2023, 240: 105459.

[8] 焦齐柱, 肖明清, 周俊超, 等. 基于乘员耳感舒适性的时速600 km磁悬浮单线隧道最优净空面积研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(12): 2993-3002.
JIAO Qizhu, XIAO Mingqing, ZHOU Junchao, et al. Study on the optimal headroom area of a 600 km/h maglev single-line tunnel based on occupant ear comfort[J]. Journal of railway science and engineering, 2020, 17(12): 2993-3002.

[9] 黄莎, 李志伟, 杨明智, 等. 高速磁浮列车通过隧道群时的压力波特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(5): 1770-1781.
HUANG Sha, LI Zhiwei, YANG Mingzhi, et al. Pressure wave characteristics of high-speed maglev train passing through tunnel groups[J]. Journal of central south university (science and technology), 2022, 53(5): 1770-1781.

[10] 赵汗冰. 高速磁浮列车通过隧道时气动性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
ZHAO Hanbing. Research on aerodynamic performance of high-speed magnetic levitation train passing through tunnel [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.

[11] CHEN Zhengwei, GUO Zhanhao, NI Yiqing, et al. A suction method to mitigate pressure waves induced by high-speed maglev trains passing through tunnels[J]. Sustainable cities and society, 2023, 96: 104682.

[12] 陈晖, 高柏松, 梅元贵. 中低速磁浮列车隧道交会时车内外压力波特征探析[J]. 机车电传动, 2020(6): 93-96.
CHEN Hui, GAO Baisong, MEI Yuangui. Analysis on characteristics of pressure wave inside and outside maglev train during tunnel intersection of medium and low speed maglev trains[J]. Electric drive for locomotives, 2020(6): 93-96.

[13] LIU Zhen, ZHOU Dan, SOPER David, et al. Numerical investigation of the slipstream characteristics of a maglev train in a tunnel[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part F: journal of rail and rapid transit, 2023, 237(2): 179-192.

[14] 张芯茹. 高速磁浮隧道压力波特性及隧道净空面积研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
ZHANG Xinru. Research on pressure wave characteristics and tunnel clearance area of high-speed magnetic levitation tunnel[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.

[15] 任魁山, 李奎, 蒋尧, 等. 中速磁浮列车双线隧道初始压缩波特征的数值模拟研究[J]. 机车电传动, 2020(6): 51-55.
REN Kuishan, LI Kui, JIANG Yao, et al. Numerical simulation study on the initial compression wave characteristics of two-lane tunnel of medium-speed magnetic levitation train [J]. Electric drive for locomotives, 2020(6): 51-55.

[16] 冉腾飞, 梁习锋, 熊小慧. 140 km/h高速地铁隧道净空断面面积研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(10): 2603-2612.
RAN Tengfei, LIANG Xifeng, XIONG Xiaohui. Study on sectional area of high-speed subway tunnel with speed of 140 km/h[J]. Journal of central south university(science and technology), 2019, 50(10): 2603-2612.

[17] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
TIAN Hongqi. Train aerodynamics[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007.

[18] 国家铁路局. 铁路应用-空气动力学 第4部分: 列车空气动力学性能数值仿真规范: TB/T 3503.4—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
National Railway Administration. Railway applications-aerodynamics−part 4: requirements for train aerodynamic simulation: TB/T 3503.4—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.

[19] NIU Jiqiang, ZHOU Dan, LIANG Xifeng, et al. Numerical simulation of the Reynolds number effect on the aerodynamic pressure in tunnels[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2018, 173: 187-198.

Aerodynamic characteristics of medium-low-speed maglev trains during intersection in two-track tunnel

JIAO Qizhu[1,2], ZHANG Mingju[1,2], XIONG Xiaohui[3,4], WANG Kaiwen[3,4], CHEN Bo[3,4]

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China;
2. National & Local Joint Engineering Research Center of Underwater Tunneling Technology, Wuhan, Hubei 430063, China;
3. Key Laboratory of Traffic Safety on Track Ministry of Education, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;
4. National & Local Joint Engineering Research Center of Safety Technology for Rail Vehicle, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: In order to investigate pressure variations on both the tunnel wall and train body surface when 140 km/h medium-low-speed maglev trains intersect in two-track tunnels, numerical calculations were performed, focusing on the effects of different parameters of the train/tunnel on the aerodynamic performance of the tunnel wall and train body surface. Moreover, a comparison was conducted across different train consist lengths and various tunnel clearance areas to assess their effects on internal train pressures. The results indicated an inversely proportional relationship between the peak value of pressure variations at measuring points on the tunnel wall and the 1.379th power of the tunnel clearance area, as well as between the peak value of pressure variations at measuring points on the train body surface and the 1.231st power of the tunnel clearance area during the intersection of 4-car maglev trains in the middle section of two-track tunnels. Additionally, under an airtightness index of 0.5 s, the pressure variations over 3 s at measuring points inside 8-car trains resulting from the intersection in tunnels with a tunnel clearance area of 66.2 m^2 increased by 102.2%, compared with the 4-car scenarios. Under an airtightness index of 8 s, this figure decreased to 50.4%. The study findings of this paper provide a reference basis for the construction of tunnels to accommodate the operation of medium-low-speed maglev trains.

Keywords: maglev train; aerodynamic characteristics; two-track tunnel; aerodynamics; numerical calculation

收稿日期：2023-12-07；修回日期：2024-05-01