

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2015.01.020

# 基于乘客舒适性的快速地铁隧道压力波分析

祝 岚<sup>1</sup> 张 东<sup>2</sup> 孙振旭<sup>3</sup> 王奕然<sup>1</sup> 杨国伟<sup>3</sup>

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司 北京 100037; 2. 北京市轨道交通设计研究院有限公司 北京 100068; 3. 中国科学院力学研究所 北京 100190)

**摘 要** 针对地铁列车在隧道内的运行特点,采用 FLUENT(6.3.26) 三维模拟软件,在列车最高运行速度 120 km/h 的条件下,对列车进出隧道洞口、在隧道内匀速运行、进出站及加减速运行、经过中间风井等多个运行场景的压力波及压力变化率进行模拟分析,提出地铁列车在隧道内运行压力波和压力变化率规律,以及在给定压力舒适度标准下的最大隧道阻塞比。

**关键词** 快速地铁; 三维模拟; 运行场景; 压力波; 阻塞比

中图分类号 U231.2 文献标志码 A

文章编号 1672-6073(2015)01-0087-05

随着城市轨道交通快线网络的出现,地铁列车最高运行速度的不断提高,给工程建设带来不少新的问题。地铁列车在隧道内高速运行,由于空气流动受隧道及车体的限制以及空气的可压缩性,导致隧道内空气压力剧烈变化,压力波动传入车厢引起乘客耳膜压痛,产生了乘客舒适度的问题。目前,国内外多采用一维可压缩非定常流动模型和特征线法,研究隧道压力波的问题。随着计算机技术的发展,三维模拟软件成为研究这一问题的另一有效工具。

笔者针对地铁列车在隧道内的运行特点,采用 FLUENT(6.3.26) 三维模拟软件,在列车最高运行速度 120 km/h 的条件下,对列车进出隧道洞口、在隧道内匀速运行、进出站及加减速运行、经过中间风井等多个运行场景的压力波及压力变化率进行模拟分析,提出地铁

列车在隧道内运行压力波和压力变化率规律,以及在给定压力舒适度标准下的最大隧道阻塞比。

## 1 计算模型的确定

### 1.1 列车模型

笔者采用 S 型地铁车作为计算模型(见图 1)。S 型地铁车是为了适应地铁列车高速运行,在原始 A 车模的基础上进行改进的车型,车头部位由钝头体改为流线型,车头长度约 4 m,保留原始车体截面,横断面为 10.49 m<sup>2</sup>。

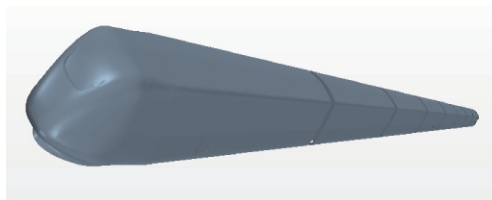


图 1 S 型车模

### 1.2 隧道模型

地铁列车在隧道内运行时,不同长度的隧道会产生不同强度的压力波,但并不是隧道越长产生的压力波越大。下面按最不利隧道长度来计算确定模型长度,有

$$L_w = L_r \left( \frac{1}{2M} + \frac{1}{1-M} \right)$$

式中,  $M$  为列车运行马赫数,  $L_w$  为隧道长度,  $L_r$  为列车长度。

列车为 8 节编组,长度约为 200 m,当列车运行速度为 120 km/h 时,计算出最不利的隧道长度为 1 200 m。以 1 200 m 作为模型长度,此时得到的压力波为隧道运行时最不利的压力波形态。图 2 为建立的标

收稿日期: 2013-12-30 修回日期: 2014-07-27

作者简介: 祝岚,女,教授级高级工程师,从事城市轨道交通通风空调设计研究工作, zhulan6773@163.com

准盾构隧道的圆形断面模型。

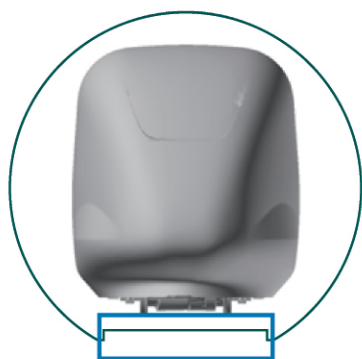


图2 隧道断面形状

### 1.3 网格划分

采用四面体网格和边界层网格混合的计算网格形式。在所有壁面上均进行边界层网格的划分,总共划分6层边界层网格,相邻边界层网格增长比为1.2,边界层网格总体厚度为6 mm。当网格划分时,在列车整车周围近场区域、转向架、风挡等位置进行局部加密。另外,对列车与轨面之间也进行局部的网格加密。局部加密造成了较大的网格量,每种方案的整体网格量均控制在2 600万左右。列车头部和中间车厢部分的纵剖面网格分布如图3所示。

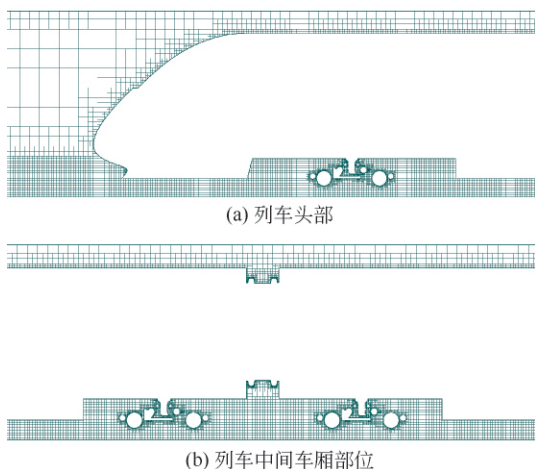


图3 纵剖面网格分布

## 2 计算条件的确定

### 2.1 车辆密闭指数

车辆密闭性的好坏直接影响到车内空气压力波动,表1给出了不同密封性能列车的气密指数范围。

表1 不同密封性能对应的气密指数

密封性评价	气密指数/s	车型
未密封	$\tau < 1$	
一般	$1 < \tau < 6$	Eurocity
好	$6 < \tau < 10$	ICE1 ,TGV
很好	$\tau > 10$	ICE3 ,Transrapid

针对以下两种气密指数的列车进行模拟:第一种为未密封列车,假定密封指数 $\tau = 0.7$  s;第二种为一般密封性能地铁,假定气密指数 $\tau = 5$  s。在分析各运行场景下的压力波时,按不利条件采用密封指数 $\tau = 0.7$  s的未密封列车进行分析。

### 2.2 模拟分析点位置

在列车头车(MH1)、中车(MM1)、尾车(MT1)部位分别设置模拟分析点,具体的分析点位置与命名如图4所示。



图4 分析点位置与命名

## 3 压力波的分析

### 3.1 地铁列车内压力舒适度标准

根据GB 50157—2013《地铁设计规范》第13.2.7条,当隧道内空气总的压力变化超过700 Pa时,其压力变化率不得大于415 Pa/s,以此作为车内乘客压力舒适度标准。

### 3.2 隧道阻塞比的确定

以地铁列车最高运行速度为120 km/h、在隧道内匀速运行时车内压力波变化率是否满足压力舒适度标准来确定隧道阻塞比,选择了洞径为5.8、6.0、6.3 m,隧道阻塞比对应为0.46、0.4、0.35三种工况进行模拟计算分析。头车、中车、尾车这三个分析点在隧道内匀速运行时车内的最大压力变化率如表2所示。

表2 列车匀速运行时车内的最大压力变化率

最大压力变化率/(Pa/s)	分析点位置		
	头车 MH1	中车 MM1	尾车 MT1
阻塞比			
0.46	573	540	496
0.40	335	305	325
0.35	319	289	290

可以看出,地铁列车最高运行速度120 km/h、隧道

阻塞比为 0.46 时,列车内压力变化率不能满足压力舒适度标准;隧道阻塞比为 0.4 与 0.35 时,列车内压力变化率满足压力舒适度标准。考虑工程的经济性,确定地铁列车最高运行速度 120 km/h 时隧道阻塞比为 0.4。

### 3.3 列车内外压力波分析

#### 3.3.1 特殊运行场景确定

与高速铁路列车通常以固定的速度通过隧道、物过程相对简单不同,地铁列车在隧道内存在频繁进

站出站、加减速及经过中间风井等运行场景。因此,对地铁列车的下列 3 种特殊运行场景的压力波进行分析:场景 1,列车进出隧道洞口;场景 2,列车经过中间风井;场景 3,列车进出站及在隧道内加减速运行。

#### 3.3.2 列车进出洞口

地铁列车的最高运行速度为 120 km/h,隧道阻塞比为 0.4,头车、中车、尾车 3 个分析点在车外与车内两种气密指数下的压力波变化曲线如图 5 所示。

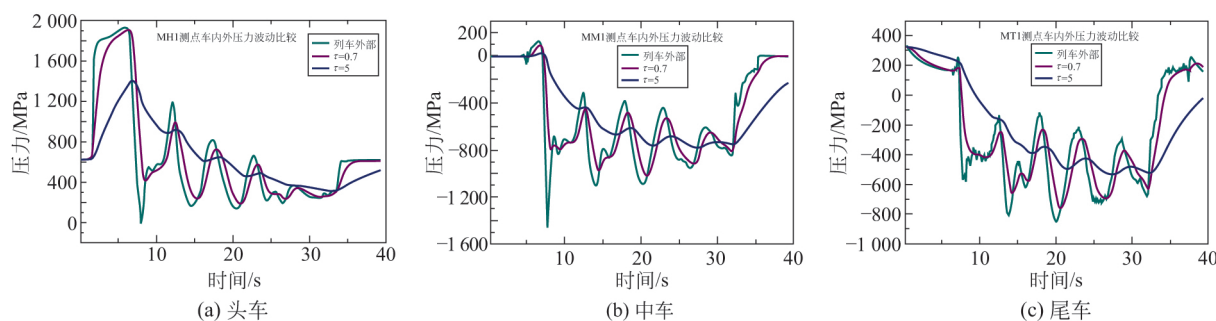


图 5 分析点的压力波动(进出洞口)

从图 5 (a) 可以看出,列车头部从明线进入隧道时,空气压力骤然升高产生压缩波;随着列车进一步进入隧道,列车与隧道形成的环状空间长度继续增加,前方压力进一步升高,列车进入隧道的部分压力也随之升高。从图 5 (b) 可以看出,中间车主要是负压波动,波动幅值比头车波动幅值要小。从图 5 (c) 可以看出,当车尾进入隧道时,尾部负压在隧道洞口处形成膨胀波,在传播过程中使列车与隧道的表面压力快速下降。同时,压缩波在对面洞口处反射形成膨胀波,膨胀波反射会再次形成压缩波,多次反射作用在车身上产生了列车表面及隧道内明显的空气压力变化曲线。

头车、中车、尾车 3 个分析点在进出隧道洞口时车内的最大压力变化率如表 3 所示。

表 3 列车进出隧道洞口车内最大压力变化率

分析点位置	头车 MH1	中车 MM1	尾车 MT1
压力变化率/(Pa/s)	639	622	496

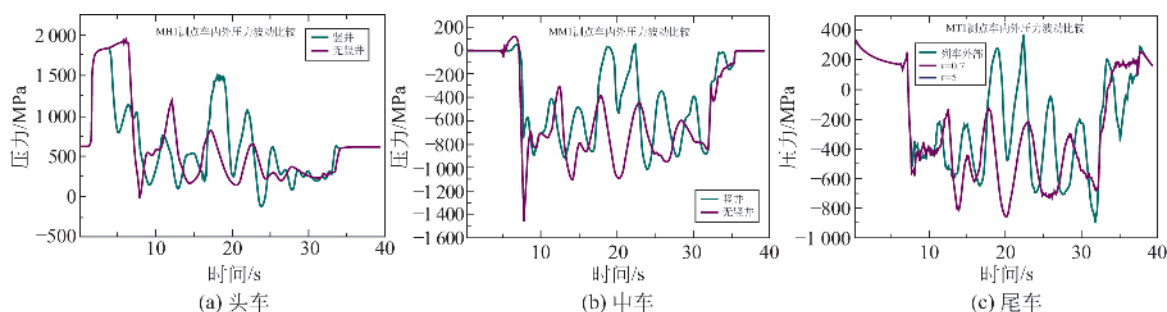


图 7 分析点的压力波动(有、无中间风井)

可以看出,列车内压力变化率在进洞口处不能满足压力舒适度标准。

#### 3.3.3 列车经过中间风井

仍以地铁列车最高运行速度为 120 km/h 进行模拟分析。同时,假定竖井所在位置位于隧道的中段,竖井截面形状为 4 m × 4 m 的正方形,竖井长度约 60 m,如图 6 所示。

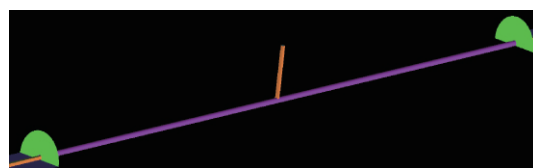


图 6 竖井位置

头车、中车、尾车 3 个分析点在有竖井和无竖井的状态下,隧道内压力波随时间的变化曲线如图 7 所示。

从图7(a)可以看出,当隧道中部有竖井的时候,头车分析点压力波有两个明显变化:一是最大正压点以及最大正压值陡降的出现时间提前;二是头车分析点经过竖井位置时将会产生较大的压力波动,该压力波幅值大于无竖井时隧道内的压力波,但小于初入隧道时形成的初始压缩波形成的波动;从图7(b)可以看出,对于中间车厢,由于竖井的存在,分析点初入隧道形成的压力波幅值都得到有效降低;从图7(c)可以看出,

由于无竖井时尾车分析点的压力波动幅值较小,有竖井时分析点在经过竖井产生的压力波动超过了无竖井时的最大压力波动,竖井对尾车分析点没有起到正向作用。整体来看,竖井的存在可以有效降低头车分析点的最大压力波幅,但却增大了分析点经过竖井时的波动。

列车通过中间风井时,头车、中车、尾车3个分析点在车外与车内两种气密指数下的压力波变化曲线如图8所示。

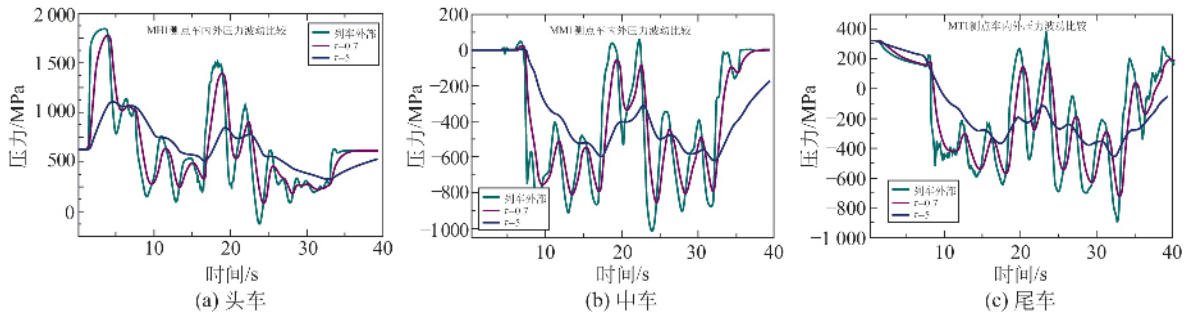


图8 分析点的压力波动(经过中间风井)

列车经过有、无中间风井隧道时,头车、中车、尾车3个分析点在车内的最大压力变化率如表4所示。

表4 列车经过有、无中间风井隧道时车内的最大压力变化率

分析点位置	头车 MH1	中车 MM1	尾车 MT1
有中间风井的压力变化率/(Pa/s)	431	402	367
无中间风井的压力变化率/(Pa/s)	335	305	325

可以看到,有竖井与无竖井相比,匀速运行时车内的压力变化率增大,但压力变化率没有超过列车入洞口处的最大压力变化率。

### 3.4 列车进出站及在隧道内加减速

研究对象仍以地铁列车最高运行速度为120 km/h为例进行分析,在进行列车进出站及隧道内加减速场景的分析时,对列车模型进行了以下简化:一是不考虑站台的面积,即整个计算物理域仅包括隧道面积;二是对于隧道内加减速场景,列车均匀降速至某一常数值,并立刻均匀加速至原来的速度值,加速度与减速度幅值一致;三是对于列车进出站场景,列车均匀降速至零,停止5 s后再均匀加速至原来的速度。

对于列车进出站及在隧道内加减速的两种工况下,列车壁面分析点设置依然与前述分析相同,各分析点的压力变化曲线如图9所示。

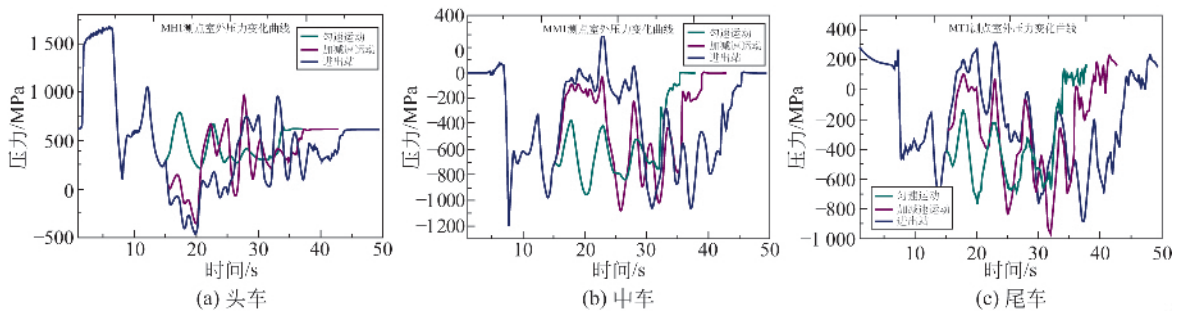


图9 分析点压力的变化(进出站及隧道内加减速)

从以上3张图可以看到,在15 s之后(即列车进洞后),对应速度变化分析点的压力变化也产生较大差异。在速度恒定的工况下,分析点压力稳定振荡,且振

荡幅值逐渐变小。

从图9(a)可以看出,头车分析点压力波变化幅值以初入隧道瞬间产生的压力波幅为最大值,在隧道内

运行时因速度变化产生的压力扰动幅值一般会小于前值,个别分析点位置甚至会接近该最大值;从图9(b)可以看出,在中间车部位因速度变化带来的压力扰动更加明显,远大于该时间段速度恒定时对应的压力波动幅值,其最大正压值甚至超过了该分析点初入隧道

时产生的最大正压值;从图9(c)可以看出,尾车附近分析点压力随速度的变化趋势与中间车类似。

列车在隧道内加减速及进出站时头车、中车两个分析点在车外与车内的压力波变化曲线如图10所示。

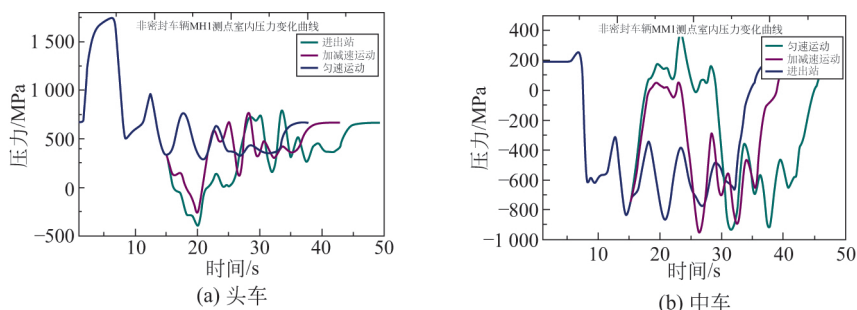


图10 分析点车内的压力变化

列车在隧道内加减速及进出站时,头车、中车两个分析点在车内的最大压力变化率如表5所示。

表5 列车加减速与进出站头车、中车最大压力变化率

分析点位置	头车 MH1		中车 MM1	
	加减速	进出站	加减速	进出站
压力变化率 / (Pa/s)	335	335	360	385

可以看到,列车加减速与进出站车内的压力变化率略大于匀速运行时车内的压力变化率,可忽略不计。

#### 4 结论

采用 FLUENT(6.3.26) 三维模拟软件,对最高运行速度 120 km/h 的高速地铁列车进行了多个阻塞比及特殊运行场景下压力波和压力变化率的模拟计算分析,得出以下结论:

- 1) 在隧道内不同运行场景下,最大压力变化率从大到小依次为:列车进出隧道洞口、经过中间风井处、进出站、在隧道内加减速、匀速运行。
- 2) 在隧道内进出站、加减速运行时,车内最大压力变化率略高于匀速运行时的状况,在模拟的最不利场景下,仍然满足压力舒适度的标准限值。因此,最高运行速度 120 km/h 的快速地铁,从满足乘客压力舒适度标准考虑,其隧道断面阻塞比不大于 0.4。
- 3) 在进出隧道洞口、经过中间风井处时,车内最大压力变化率超过压力舒适度标准限值,需采取缓解压力波剧烈变化的措施。

#### 参考文献

[1] 王迪军,罗燕萍,张智力. 高速地铁隧道内压力变化分析

研究[J]. 地铁与轻轨, 北京, 2003(3): 38-41.  
 [2] 骆建军,王梦恕. 高速列车穿越有竖井隧道流场的特性研究[J]. 计算力学学报, 2006(4): 464-469.  
 [3] 王建宇,万晓燕,吴剑撰. 隧道长度对瞬变压力的影响[J]. 现代隧道技术, 2008(6): 1-4.  
 [4] 吴炜,彭金龙. 快速地铁隧道空气动力学效应研究[J]. 城市轨道交通研究, 2011(12): 37-41.  
 [5] 杨伟超,彭立敏,施成华,等. 地铁条件下车体表面压力的变化特性分析[J]. 空气动力学学报, 2010(1): 76-81.  
 [6] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.

(编辑:郭洁)

### Analysis of Pressure Waves of High-speed Subway Tunnel Based on Passenger Comfort

Zhu Lan<sup>1</sup> Zhang Dong<sup>2</sup> Sun Zhenxu<sup>3</sup>  
 Wang Yiran<sup>1</sup> Yang Guowei<sup>3</sup>

(1. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd, Beijing 100037; 2. Beijing Rail and Transit Design & Research Institute Co., Ltd, Beijing 100068; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract:** Based on the characteristics of subway trains running in tunnel, the pressure waves and maximum pressure gradient of several running scenarios were studied in the paper. The pressure waves and maximum pressure gradient for trains passing by the tunnel entrance, running in the tunnel with a speed of 120km/h, with an accelerated speed or decelerated speed, and passing by the tunnel with an air shaft have all been simulated and analyzed with the help of the commercial software FLUENT (6.3.26). Finally, the blockage ratio under selected pressure amenity standard has been proposed.

**Key words:** high speed subway; three-dimensional simulation; running scenarios; pressure wave; blockage ratio