

文章编号: 1005-0523(2006)05-0020-04

# 横通道对隧道出口微压波影响的数值模拟研究

岳楹沁, 高波

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 采用三维粘性、等熵、可压缩、非定常流的 Navier-Stokes 方程, 用有限体积法进行区域离散, 对高速列车通过设置有横通道的隧道时所引起的出口微压波进行模拟. 研究表明, 横通道能降低隧道内的空气压力, 其位置和断面大小都对出口微压波有重要影响.

**关键词:** 横通道; 高速铁路隧道; 微压波

**中图分类号:** TU3

**文献标识码:** A

当高速列车通过隧道时, 在列车前面产生的压力上升即压缩波, 此波沿着隧道向前传播, 在隧道出口处, 次压缩波向进口反射成膨胀波, 与此同时, 一个脉冲波自隧道出口向周围地区辐射出去, 从而产生了一个新的环境问题, 即对附近居民造成影响, 此脉冲波称为微压波 (见图 1). 利用在隧道修建中的辅助设施横通道来减小微压波是经济有效的办法, 而当隧道具有横通道时, 列车进入隧道时产生的空气压缩波到达横通道与隧道的连接部位时, 由于断面积的变化, 从而产生膨胀波, 并在隧道内产生更为复杂的波的迭加现象. 因此本文借助相关流体软件, 采用三维粘性、可压缩、等熵、非定常流的数学模型对有横通道的隧道进行数值模拟, 分析横通道对隧道出口微压波的影响情况.

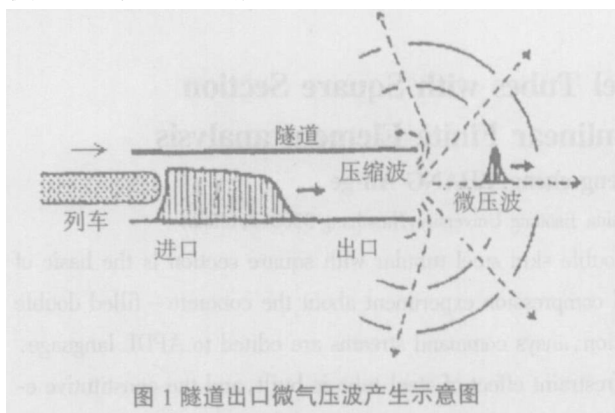


图 1 隧道出口微气压波产生示意图

## 1 数值计算模型

### 1.1 有限体积法的基本思想

有限体积法 (Finite Volume Method) 又称为控制体积法. 其基本思想是: 将计算区域划分为网格, 并将每个网格点周围有一个互不重复的控制体积; 将待解微分方程 (控制方程) 对每一个控制体积积分, 从而得出一组离散方程. 其中的位置数是网格上的因变量  $\Phi$ . 为了求出控制体积的积分, 必须假定  $\Phi$  值在网格点之间的变化规律. 从积分区域的选取方法看来, 有限体积法属于加权余量法中的子域法, 从未知解的近似方法看来, 有限体积法属于采用局部近似的离散方法. 简言之, 子域法加离散, 就是有限体积法的基本方法.

有限体积法的关键是在导出离散方程过程中, 要对界面上的被求函数本身及其导数的分布作出某种形式的假定. 用有限体积法导出的离散方程可以保证具有守恒特性, 而且离散方程系数物理意义明确, 计算量相对较小. 因此控制方程的建立和边界条件的处理成为整个数值模拟中的关键.

### 1.2 控制方程

在笛卡尔坐标系下, 对空间任意控制体, 采用有限体积法进行离散后, 其积分形式的三维可压缩

收稿日期: 2006-04-18

作者简介: 岳楹沁 (1980-), 男, 四川资阳人, 西南交通大学研究生, 从事隧道空气动力学的研究.

性 Navier-Stokes 方程可写为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V U dV + \int_{\alpha'} F \cdot n dS = \int_{\alpha'} G \cdot n dS \quad (1-1)$$

式中,  $U = [\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad \rho w \quad \rho E]^T$

$$F = \begin{bmatrix} \rho u & \rho v & \rho w \\ \rho u^2 + p & \rho uv & \rho uw \\ \rho uv & \rho v^2 + p & \rho vw \\ \rho wu & \rho vw & \rho w^2 + p \\ \rho uH & \rho vH & \rho wH \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \\ l & m & n \end{bmatrix}$$

其中,  $l = u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} - q_x$ ,  $n = u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} - q_y$ ,  $n = u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\tau_{zz} - q_z$ , 式中:  $\rho$  为气体的密度,  $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  方向的速度,  $p$  为压力,  $E$  为单位体积的总能量,  $\tau$  为粘性应力张量,  $q_x, q_y, q_z$  分别为热流通量的分量,  $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \dots, \tau_{zz}$  为 Stokes 给出的剪应力分量;  $n$  为法向矢量;  $S$  为面积;  $H$  为焓.

$$q_x = -K \frac{\partial T}{\partial x}, q_y = -KK \frac{\partial T}{\partial y}, q_z = -KK \frac{\partial T}{\partial z}$$

式中:  $K$  为热传导系数;  $T$  为热力学温度.

为了封闭上述方程组, 必须引进气体的状态方程以及流体的运输方程式:

$$p = \rho RT, P = (\gamma - 1) [E - \rho(u^2 + v^2 + w^2)/2], H = E + p/\rho \quad (1-2)$$

式中:  $R$  为气体常数;  $\gamma = c_p/c_v$ , 其中  $c_p$  为定压比热容,  $c_v$  为定容比热容

### 1.3 边界条件及流场的初始化

#### (1) 隧道壁面的处理

由于隧道壁面(横通道)粗糙度的影响, 导致近隧道壁面处并非涡流模型, 因此可以采用标准壁面函数来模拟近隧道壁面处的流体.

#### (2) 列车表面的处理

在列车的壁面上施加无滑移边界条件, 即流体的法向速度为零  $u_n = 0$ . 在用动量方程计算列车表面上流体的切向速度时, 假定列车表面上压力梯度的法向分量为零.

#### (3) 隧道内地板的处理

对于隧道地板碎石道床的影响, 由于气体在隧道内向前运动的过程中不断地渗入到道床的石头

缝隙中, 能量损失较大, 导致压力梯度有较大的变化, 因而对于近底板处气流可以采用非平衡态壁面函数来模拟.

#### (4) 压力远场边界条件

压力远场边界条件是基于黎曼不变量的无反射边界条件, 计算区域内产生的压力波在该处不是反射波而是透射波. 在远场边界处, 对于亚音速可压缩流来说, 存在两个不变量, 即对应于输入与输出波, 有:

$$R_\infty = V_{n\infty} - \frac{2c_\infty}{\gamma - 1}, R_i = V_{ni} - \frac{2c_i}{\gamma - 1} \quad (1-3)$$

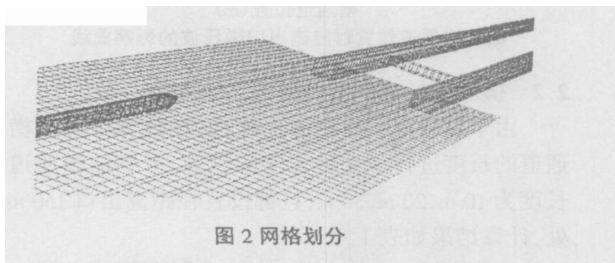
这里,  $V_n$  为边界处法向速度大小,  $c$  为当地音速,  $\gamma$  是理想气体热导率. 下标  $\infty$  代表远场边界处外侧(即无穷远处),  $i$  代表远场边界处内侧(即计算区域内与边界邻接的边界单元). 并且有:

$$V_n = \frac{1}{2}(R_i + R_\infty), c = \frac{\gamma - 1}{4}(R_i - R_\infty) \quad (1-4)$$

在边界处, 流体流出的一面的切向速度分量和熵值都通过插值函数从流场内部得到; 而流体流入的一面, 这些值则指定为自由流场的值. 通过利用  $V_n, c$  切向速度分量和熵值就可以计算出边界处理理想气体的密度、速度、温度以及压力.

### 1.4 网格划分

由于列车与隧道之间是一种相对运动, 当列车向前运动时, 计算区域边界不断发生变化, 故采用移动网格模型来处理. 整个区域划分成不同的子区域并形成子区域边界, 各子区域单独进行网格划分.



### 1.5 计算参数

本文采用通用流体计算软件 fluent 对高速列车通过隧道的空气动力学效应进行了数值模拟计算. 计算参数如下: 隧道长度 500 m, 断面为矩形其宽度 7.9 m, 高度 7.6 m, 断面积为 60.4 m<sup>2</sup>; 列车长度为 100 m, 断面积为 15.392 m<sup>2</sup> (3.7 m × 4.16 m), 阻塞比为 0.256. 单个横通道断面积为 16 m<sup>2</sup> (4 m × 4 m)

## 2 计算结果分析

### 2.1 横通道位置对出口微压波的影响

计算中分别通过在距离隧道入口 50 m, 100 m, 150 m, 200 m, 250 m, 300 m, 350 m, 400 m, 450 m 设置横通道, 列车时速 250 km/s, 比较了横通道位置的不同对于隧道出口微压波的影响情况。

图 3 绘制了由于横通道位置的不同, 引起的出口微压波峰值的不同, 从中可以看到在距离隧道出口附近设置横通道优于在其他位置。但是, 同时也发现, 位置的不同对于隧道出口微压波的削减作用差异不大。分析原因: 1. 在单线隧道内, 轨道两侧的空气动力学效应基本是对称的, 上下两侧不对称, 而横通道仅设置在隧道边壁的一侧, 分流效果不明显。2. 测点位置是设置在隧道中线距隧道底板 2m 处, 由于测点位于水平对称面上, 而横通道的设置不对称, 对检测结果有一定程度的影响。3. 横通道断面积取值较小, 而通常情况下, 辅助坑道的断面积越大, 降压效果越好。

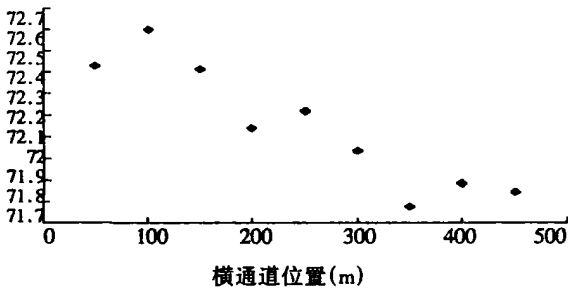


图 3 横通道位置对隧道出口微压波的影响曲线

### 2.2 横通道长度对出口微压波的影响

由于横通道断面积的局限性, 在计算中对于横通道的长度进行了 3 种长度的试算, 分别取横通道长度为 10 m, 20 m, 30 m, 且都设置在距离出口 150 m 处。计算结果如表 1。

表 1 横通道长度对隧道出口微压波的影响

横通道长度	无横通道	10 m	20 m	30 m
出口微压波(pa)	80.255	83.578	76.375	71.781
微压波峰值出现时间(s)	3.009	3.075	3.079	3.076

随着横通道长度的增加, 出口微压波峰值有了显著的变化, 而横通道长度较短(10 m)时, 出口微压波峰值反而有所增大, 这是因为当列车经过横通道时会再一次产生压缩波, 而 10 m 的横通道还不足以削减新一次的压缩波, 因而造成了出口微压波峰值的增大。

### 2.3 横通道数目对出口微压波的影响

针对以上出现的问题, 设置一条横通道时降压效果并不明显, 因此建立多条横通道, 分别在 500m 隧道内设置 2 条, 3 条, 4 条横通道, 数值计算所得到的结果如图 4, 其纵坐标为出口微压波峰值(pa)

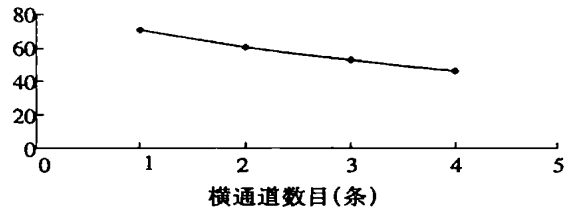


图 4 横通道数目对隧道出口微压波的影响曲线

设置多条横通道时, 出口微压波得到了明显的降低。当设置 4 条横通道时, 微压波降低了 41.6%, 降压效果显著。

### 2.4 隧道长度对出口微压波的影响

随着隧道长度的增加, 由于列车通过隧道时所经历的列车表面和隧道壁面环状空间的增大, 出口微压波有自然衰减的趋势, 见表 2。

表 2 列车时速 250 km/h 隧道长度对出口微压波的影响

隧道长度	500 m	1 000 m	2 000 m
出口微压波峰值(pa)	80.25781	70.50781	58.53125

随着隧道长度的继续增加, 衰减的趋势会更加明显, 隧道内大部分区域的空气动力学效应呈现反复交替的现象, 这与较短隧道中压力波传播放射的过程是类似的, 长隧道只是将这个过程延长。

## 3 结论

通过对高速列车突入无横通道隧道和设置不同断面积, 不同位置横通道的铁路隧道出口微压波的三维数值模拟, 可以得出以下结论:

(1) 高速列车通过隧道, 单个横通道位置的不同对隧道出口微压波的影响不显著。

(2) 横通道的长度对于隧道出口微压波的影响显著, 但当横通道的长度超过 30m 时, 可忽略长度增加的减压效果。数值模拟的结果还表明设置于隧道入口的横通道越长越好, 而设置于隧道出口的横通道, 越短反而有越好的减压效果。

(3) 横通道的设置削减了隧道出口微压波峰值, 同时随着横通道断面积的增大, 削减作用进一步明显。

(4) 仅设置一条横通道起到降低了隧道出口微压波的作用, 随着横通道的增多, 降压效果越加显

著.

(5) 隧道内压力波的传播是个复杂的过程,制约的因素也很多,仅从横通道设置的角度出发还远远不够,长大隧道空气动力学效应的数值模拟计算是必要的.

(6) 实际工程中,在其他降压措施受限的情况下,利用横通道的设置或是利用已有的横通道配合其他降压措施完全可以达到符合标准的降压效果.

#### 参考文献:

- [1] Yamamoto A. Pressure variation, aerodynamics drag of trains, and natural ventilation in SHINKSEN Type Tunnel. QR of RTRI. 1974, 207 — 214
- [2] 小智. トンネル出口微 压波の研究. 日本国有铁路

铁道技术研究所. 1979

- [3] T. Maeda, T. Matsumura, M. Iida, K. Nakatani, K. Uchida. Effect of shape of train nose on compression wave generated by train entering tunnel. In: International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, Yokohama, Japan, 1993.
- [4] Matschke, G. 1999 Full scale tests on pressure wave effects in tunnel. TRANSAE-RO Symposium (Transient Aerodynamics Railway System Optimization), Paris, France.
- [5] 骆建军, 高波, 王英学. 高速列车穿越隧道时压力变化的数值模拟[J]. 中国铁道科学. 2003, 24(3): 82~86.
- [6] 何德昭, 徐鹤寿. 列车通过隧道诱发的气动变化规律的试验研究[J]. 中国铁道科学. 1997, 18(4): 42~49.
- [7] 赵文成, 高波, 漆泰岳. 高速铁路隧道出口微压波及其主被动减缓措施[J]. 石家庄铁道学院学报. 2004, (3): 8~12.

## Study of the Influence over Cross Passage on High-speed Railway Tunnel Exit Micro-pressure Wave

YUE Ying-qin, GAO Bo

(Civil Engineering Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** This paper presents a cell-centered finite volume scheme for numerical integration of Navier-Stokes equations for three-dimensional unsteady viscous compressible non-homentropic flow to simulate the micro-pressure wave produced by a high-speed train entering a tunnel with a transverse passage way. The research shows that the cross passage can sharply decrease the peak of the high-speed railway tunnel exit micro-pressure wave, and the site or of the cross passage or the size of the cross passage sectional area play a significant effect on the peak of the micro-pressure wave.

**Key words:** cross passage; high-speed railway tunnel; micro-pressure wave