

# 隧道活塞风速计算方法及其影响因素分析

罗忠<sup>1,2</sup>, 韩贵鑫<sup>1,2</sup>, 赵凯<sup>3</sup>, 黄树智<sup>3</sup>  
(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 3. 沈阳地铁集团有限公司运营分公司, 辽宁 沈阳 110011)

**摘 要:** 针对隧道内活塞风会对安全门和广告灯箱等引起破坏的问题,开展了地铁单线无风井和有风井两种形式的隧道空气动力学特性分析,建立了隧道各断面之间的一维伯努利方程和流体连续性方程,研究了不同形式隧道下活塞风速的理论计算模型. 并使用 SES 软件建立其仿真模型对计算模型的结果进行验证,重点研究了对活塞风速影响的主要因素. 结果表明:隧道内活塞风速与列车速度、列车长度和列车外表面光洁度等成正比例关系,而活塞风井高度、断面面积和风井位置等参数对活塞风速影响不大. 所提出的计算模型可用于实际工程中活塞风速的简便计算.

**关 键 词:** 地铁隧道; 活塞风; 地铁环境模型; 环控软件 SES; 速度场  
**中图分类号:** U 453.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2019)05-0694-06

## Piston Wind Speed Calculation Method and Analysis of Influence Factors for Subway Tunnel

LUO Zhong<sup>1,2</sup>, HAN Gui-xin<sup>1,2</sup>, ZHAO Kai<sup>3</sup>, HUANG Shu-zhi<sup>3</sup>  
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education on Vibration and Its Control of Aerospace Power Equipment, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Shenyang Operation Branch of Metro Group Company Limited, Shenyang 110011, China. Corresponding author: LUO Zhong, E-mail: zhluo@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** To avoid damages by the piston wind to the safty doors and AD light boxes in subway tunnels, the aerodynamic characteristics of subway tunnel with and without shaft were analyzed, one-dimensional Bernoulli equations and fluid continuity equations between tunnel sections were established, the numerical calculation model of the piston wind under different tunnels were analyzed, the simulation model established by SES software and calculation model results were also verified. The principal factors affecting the piston wind speed are studied. The results show that the piston wind speed is proportional to the train speed, the length of the train and the smoothness of the train surface. The height, the section area and the position of the air shaft have little effect toward the piston wind speed. The proposed numerical calculation model can be used for the simple calculation of the piston wind speed in actual projects.

**Key words:** subway tunnel; piston wind; subway environmental model; SES (subway environmental simulation); velocity field

活塞风速是地铁设计时需参考的重要参数之一,它不仅对隧道内空气的流动特性和空气品质有重要影响<sup>[1]</sup>,而且还对地铁的行车安全有影响. 因为活塞风具有一定的速度,它会对隧道区间内的防火门产生压力,同时由于地铁列车发车频率高,时间间隔短,长期往复运动会导致防火安全门跌落,一旦防火安全门跌落,就会影响地铁的正常运行,甚至会造成车毁人亡的惨剧.

目前针对地铁隧道内活塞风的研究,主要包括对活塞风速进行数值求解和使用流体软件对隧

道活塞风速进行仿真求解. 金学义等<sup>[2]</sup>对铁路隧道进行现场实测和理论研究,通过建立隧道各断面之间的伯努利方程和连续性方程,得出了铁路隧道活塞风速理论计算模型;王丽慧<sup>[3]</sup>在前者研究的基础上,重点研究了活塞风风速和风压对区间车站速度场及温度场的影响;Lin 等<sup>[4]</sup>以台北某地铁隧道为研究对象,研究了隧道中活塞效应对地铁区间隧道通风效果的影响;Yuan 等<sup>[5]</sup>使用 AIRPAK 软件模拟了实际地铁站台内的温度与风速之间的关系;González 等<sup>[6]</sup>利用 FLUENT 软件中的移动网格来模拟列车位移,分析了活塞效应对节能的影响;Juraeva 等<sup>[7]</sup>使用 CFX 软件求解雷诺平均 Navier – Stokes 方程,通过对地铁隧道内稳定的三维气流进行研究,分析出通风井处流量和隧道内的气流速度;Leung 等<sup>[8]</sup>利用该软件对海底隧道正常及事故工况下的通风方案进行了验证;Wittig 等<sup>[9]</sup>建立 SES 模型来研究隧道内空气中有害物质的扩散情况.

本文在借鉴前人研究的基础上,基于伯努利方程和流体连续性方程,研究得到有风井隧道和无风井隧道两种不同形式隧道下活塞风的数值计算模型,并使用环控软件 SES 对其进行验证. 基于该模型,针对多种不同工况下的风速进行分析,得到活塞风速的主要影响因素. 此理论计算模型可为实际工程应用提供了一种简易又准确的计算方法.

## 1 列车活塞风数值计算模型

地铁列车在隧道区间内行驶时,由于隧道边壁对空气流动的束缚,被挤压的空气一部分沿列车前进方向继续向前流动,另一部分则会通过列车与隧道之间的环形区域向后方流动,这种现象称为活塞效应,形成的风称为活塞风. 现有地铁隧道中主要包括有风井隧道和无风井隧道两种形式,现分别对两种不同形式的隧道进行分析.

### 1.1 无风井隧道数值计算模型

如图 1 所示,无风井隧道整体呈长直状,其长度  $L$  远大于其隧道直径  $d$  ( $L/d > 50$ );且隧道中空气的流动主要沿轴线方向,故可将气流运动视为沿轴线方向的一维运动<sup>[4]</sup>.

除隧道进口和出口端外,可认为地铁在无风井隧道内匀速运行形成的流场中各空间点的流动要素如压力、流速等均不随时间变化,即稳定流动<sup>[5]</sup>. 为方便研究并对无风井隧道做出以下假设:

- 1)隧道内无坡度变化,无截面积变化;
- 2)隧道出入口处风压均为当地大气压;
- 3)壁面粗糙度不变,且隧道内初始风速为 0.

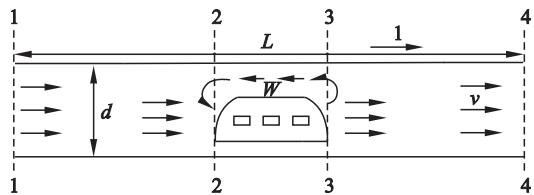


图 1 无风井隧道内列车运行时活塞风分布  
Fig. 1 Piston wind distribution in train operating in tunnel without shaft

针对无风井隧道断面,建立隧道 1 – 2 段、2 – 3 段、3 – 4 段的伯努利方程和流体连续性方程,其中 1 – 1 和 4 – 4 断面为隧道入口和出口断面;2 – 2 为列车车尾断面;3 – 3 为车头断面.

行驶时,车身与隧道之间形成环状区域,设列车的运行速度为  $v_0$ ,活塞风速为  $v$ ,环状区域气流相对于列车速度为  $v_s$ ,隧道对列车阻塞比为  $\alpha$ ,则:

$$v_s = (v_0 - v)/(1 - \alpha), \tag{1}$$

$$P_3 - P_2 = (\varepsilon_1 + \lambda_0 l_0/d_0 + \varepsilon_2) \rho v_s^2/2. \tag{2}$$

式中: $P_3$ 、 $P_2$  分别为 3 – 3 断面和 2 – 2 断面的静压值; $\lambda_0$  为列车与隧道之间所形成环状区域的沿程阻力系数; $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  分别为环状区域与列车前方隧道和列车后方隧道的局部阻力损失系数<sup>[3]</sup>;  $l_0$  为列车长度; $d_0$  为环状区域水力直径; $\rho$  为空气密度.

令:

$$\varepsilon_1 + \lambda_0 l_0/d_0 + \varepsilon_2 = N_1. \tag{3}$$

将式(1) ~ 式(3)进行联立,可得到列车前后断面的压力差:

$$P_3 - P_2 = \frac{N_1}{(1 - \alpha)^2} \cdot \frac{\rho (v_0 - v)^2}{2}. \tag{4}$$

对隧道 1 – 2 段、2 – 3 段、3 – 4 段之间的伯努利方程进行联立,可得

$$P_3 - P_2 = (\varepsilon + \lambda \frac{l_{12} + l_{34}}{d} + 1) \frac{\rho v^2}{2} = (\varepsilon + \lambda \frac{l - l_0}{d} + 1) \frac{\rho v^2}{2}. \tag{5}$$

式中: $\lambda$  为隧道沿程阻力系数; $l_{12}$  和  $l_{34}$  分别为隧道 1 – 2 段和隧道 3 – 4 段之间的长度; $d$  为隧道水力直径; $\varepsilon$  和  $l$  分别为隧道入口和出口处局部阻力系数.

令  $N_2 = \varepsilon + \lambda \frac{(l - l_0)}{d} + 1$ , 式(5)可表示为

$$P_3 - P_2 = (\varepsilon + \lambda \frac{l - l_0}{d} + 1) \frac{\rho v^2}{2} = N_2 \frac{\rho v^2}{2}. \quad (6)$$

由式(4)和式(6)联立,求得列车活塞风速  $v$ :

$$v = \frac{v_0}{1 + \sqrt{\frac{N_2}{N_1}(1 - \alpha)^2}}. \quad (7)$$

1.2 有风井隧道数值计算模型

图2为有风井隧道示意图,活塞风在列车的推动下下一部分空气向前移动,经过风井和隧道出口排出到室外,另一部分经隧道和列车间的环状区域流到列车后方,此处风井可以起到排风减压的作用.

$P_1 \sim P_8$  分别代表隧道内 1~8 断面的静压值,  $v_1, v_7$  分别表示断面 1 和 7 处的风速,  $v$  为活塞风速,  $v_0$  表示列车的车速,  $v_6, v_8$  分别为断面 6 和 8 处的风速值.

现分别建立隧道 1-2 段, 7-2 段, 2-3 段, 4-5 段, 5-6 段, 5-8 段的伯努利方程:

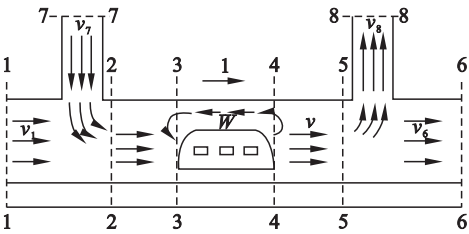


图2 有竖井隧道内地铁车辆的活塞风流场  
Fig. 2 Piston wind distribution in train operating in tunnel with shaft

$$P_1 = P_2 + \frac{\rho v^2}{2} + (\varepsilon_3 + \frac{\lambda_3 l_{12}}{d_0}) \cdot \frac{\rho v_1^2}{2} + \eta_{12} \frac{\rho v_1^2}{2}, \quad (8)$$

$$P_7 = P_2 + \frac{\rho v^2}{2} + (\varepsilon_4 + \frac{\lambda_1 h_1}{d_1}) \cdot \frac{\rho v_6^2}{2} + \eta_{72} \frac{\rho v_7^2}{2}, \quad (9)$$

$$P_2 + \frac{\rho v^2}{2} = P_3 + \frac{\rho v^2}{2} + \frac{\lambda_3 l_{23}}{d_0} \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (10)$$

$$P_4 + \frac{\rho v^2}{2} = P_5 + \frac{\rho v^2}{2} + \frac{\lambda_3 l_{45}}{d_0} \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (11)$$

$$P_5 + \frac{\rho v^2}{2} = P_6 + \frac{\rho v^2}{2} + (1 + \frac{\lambda_3 l_{56}}{d_0}) \cdot \frac{\rho v_6^2}{2} + \eta_{56} \frac{\rho v_6^2}{2}, \quad (12)$$

$$P_5 + \frac{\rho v^2}{2} = P_8 + \frac{\rho v^2}{2} + (1 + \frac{\lambda_2 h_2}{d_2}) \cdot \frac{\rho v_8^2}{2} + \eta_{58} \frac{\rho v_8^2}{2}. \quad (13)$$

式中:  $\varepsilon_3$  和  $\varepsilon_4$  分别为断面 1, 7 处的入口局部阻力系数;  $\eta_{12}, \eta_{72}, \eta_{56}, \eta_{58}$  分别为气流经过各三通处的局部阻力系数;  $\lambda_1, \lambda_2$  分别为风井 7, 8 的沿程阻力系数;  $\lambda_3$  为隧道沿程阻力系数;  $l_{ij}$  为隧道段  $i$  与  $j$  ( $i, j = 1, 2, \dots, 6$ ) 之间的长度;  $d_0, d_1, d_2$  分别为隧道段、风井 7 和风井 8 的水力直径;  $h_1, h_2$  分别为

风井 7 和风井 8 的高度.

$$P_4 - P_3 = (\varepsilon_7 + \frac{\lambda_3 l_0}{d_0} + \varepsilon_8) \frac{\rho v_s^2}{2}. \quad (14)$$

式中,  $\varepsilon_7$  和  $\varepsilon_8$  分别为环状区域与前方隧道和后方隧道的局部阻力损失系数. 现联立式(8)和式(9)有

$$(\varepsilon_3 + \frac{\lambda_3 l_{12}}{d_0} + \eta_{12}) \cdot v_1^2 = (\varepsilon_4 + \frac{\lambda_1 h_1}{d_1} + \eta_{72}) \cdot v_7^2.$$

可得

$$v_1 = K_1 \cdot v_7. \quad (15)$$

其中,

$$K_1 = \sqrt{(\varepsilon_4 + \frac{\lambda_1 h_1}{d_1} + \eta_{72}) / (\varepsilon_3 + \frac{\lambda_3 l_{12}}{d_0} + \eta_{12})}.$$

建立隧道段 1, 2, 7 处的连续性方程:

$$v_1 \cdot A_0 + v_7 \cdot A_7 = v \cdot A_0. \quad (16)$$

所以活塞风速可表示为

$$v = (A_0 + \frac{A_7}{K_1}) \cdot \frac{v_1}{A_0}. \quad (17)$$

同理, 建立隧道段 5, 6, 8 处的伯努利方程和连续性方程可得

$$v = (A_0 + \frac{A_8}{K_2}) \cdot \frac{v_6}{A_0}. \quad (18)$$

将式(17), 式(18)分别代入到式(10)和式(11)中, 得到列车前后的压力差  $P_4 - P_3$  为

$$P_4 - P_3 = (2 + \frac{\lambda_3 l_{56}}{d_0} + \eta_{56}) \cdot \frac{\rho v_6^2}{2} + (\varepsilon_1 + \frac{\lambda_3 l_{12}}{d_0} + \eta_{12}) \cdot \frac{\rho v_1^2}{2} + (\frac{\lambda_3 l_{45}}{d_0} + \frac{\lambda_3 l_{23}}{d_0}) \cdot \frac{\rho v^2}{2}. \quad (19)$$

为简化运算, 令:

$$K_3 = \left( 2 + \frac{\lambda_3 l_{56}}{d_0} + \eta_{56} \right) \cdot \left( \frac{K_2 \cdot A_0}{K_2 \cdot A_0 + A_8} \right)^2,$$

$$K_4 = \left( 2 + \frac{\lambda_3 l_{56}}{d_0} + \eta_{56} \right) \cdot \left( \frac{K_1 \cdot A_0}{K_1 \cdot A_0 + A_7} \right)^2,$$

$$K_5 = \left( \frac{\lambda_3 l_{45}}{d_0} + \frac{\lambda_3 l_{23}}{d_0} \right) = \frac{\lambda_3 (l_{25} - l_0)}{d_0},$$

$$K_6 = \frac{\left( \varepsilon_7 + \frac{\lambda_0 l_0}{d_0} + \varepsilon_8 \right)}{(1 - \alpha)^2}.$$

式(19)可整理为

$$K_6 \cdot (v_0 - v)^2 = (K_3 + K_4 + K_5) \cdot v^2. \quad (20)$$

所以列车在带有竖井的隧道内行驶时, 活塞风速  $v$  为

$$v = \frac{\sqrt{K_6}}{\sqrt{K_3 + K_4 + K_5} + \sqrt{K_6}} \cdot v_0 = \frac{\sqrt{K_6 (K_3 + K_4 + K_5)} - K_6}{K_3 + K_4 + K_5 - K_6} \cdot v_0. \quad (21)$$

## 2 SES 软件仿真模型

SES 软件主要由列车运行子程序、空气动力学子程序、温度/湿度子程序、热积聚/环境控制子程序,即四个互相关联的子程序组成<sup>[10]</sup>. 它可准确地用来模拟地铁内各工况下隧道、车站和活塞风井处的风速、风量和温湿度等,是一款被国际上广泛认可的地铁模拟软件,并得到了广泛使用.

### 2.1 无风井隧道仿真计算模型

SES 软件数学模型一般由四部分组成:节点 (node)、段 (section)、节 (segment) 和子节 (subsegment). 其中节点用来连接各段,各段之间空气流量大小、方向相同,段再划分为多个节,每个节的几何形状,节内空气流量和流速的大小、方向均相同,其中节可分为线段节 (line segment) 和风井节 (shaft) 两种. 以参考文献[11]的隧道参

数为例,建立如图 3 所示的无风井隧道 SES 系统模型.

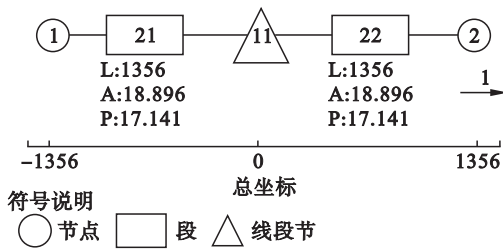


图 3 无风井隧道 SES 模型

Fig. 3 Model of SES in tunnel without shaft

### 2.2 有风井隧道理论计算模型

仍以参考文献[11]的隧道参数为例,建立如图 4 所示的有风井模型. 该模型与无风井隧道模型的不同在于节点(2,3)处活塞风井的设置,活塞风井(41,42)其位置距离分别距离隧道出入口 500 m 处,风井截面为 4 m × 4 m,风井高为 20 m,风井内表面的摩擦系数为 0.03<sup>[3]</sup>.

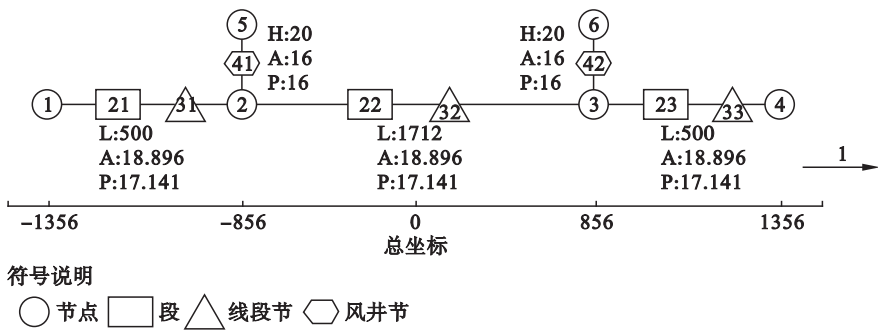


图 4 有风井隧道 SES 模型

Fig. 4 Model of SES in tunnel with shaft

## 3 算例验证

以文献[11]的隧道参数为例进行对比验证,其列车及隧道参数如表 1 所示.

表 1 隧道区间参数表

Table 1 Tunnel interval parameters table

| 基本输入数据               | 符号        | 数值     | 基本输入数据                    | 符号          | 数值     |
|----------------------|-----------|--------|---------------------------|-------------|--------|
| 隧道分段长度/m             | $L_T$     | 2712   | 列车长度/m                    | $L_t$       | 114    |
| 隧道壁面摩擦系数             | $\lambda$ | 0.025  | 列车表面摩擦系数                  | $\lambda_0$ | 0.010  |
| 隧道断面积/m <sup>2</sup> | $A$       | 18.986 | 列车平均断面积/m <sup>2</sup>    | $A_0$       | 10.032 |
| 隧道湿周长度/m             | $l$       | 17.141 | 列车速度/(m·s <sup>-1</sup> ) | $v$         | 22.22  |

### 3.1 无风井隧道风速计算结果对比

以文献[11]的隧道参数为例,分别将 SES 仿真模型的计算结果、本文导出的计算模型计算结

果和文献[11]的结果进行对比.

列车的加权横截面积为 10.032 m<sup>2</sup>,隧道断面的加权横截面积为 18.986 m<sup>2</sup>,列车在隧道内阻塞比为  $\alpha = A_0/A = 0.528$ ,根据流体力学局部水头损失公式<sup>[2]</sup>:

$$\varepsilon_1 = (1 - \alpha)^2 = (1 - 0.528)^2 = 0.223,$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2} \cdot (1 - \alpha)^{\frac{3}{4}} = \frac{1}{2} \cdot (1 - 0.528)^{\frac{3}{4}} = 0.285.$$

根据式(3)和式(6)求得  $N_1 = 0.764$ ,  $N_2 = 16.160$ ,将数据代入到式(7)中,得

$$v = 7.007 \text{ m/s}.$$

对比结果如表 2 所示,当列车以 22.22 m/s 的速度在无风井隧道内匀速行驶时,活塞风速理论计算模型结果为 7.008 m/s,SES 模拟结果为 7.003 m/s,参考文献结果为 7.623 m/s. 三个结果偏差不大,本文提出的计算结果与 SES 模拟结果更接近.



表 2 计算数据对比

| Table 2 | Calculated data comparison |       | $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |
|---------|----------------------------|-------|------------------------------|
| 变量      | SES 模拟结果                   | 文献结果  | 理论计算结果                       |
| 风速      | 7.003                      | 7.623 | 7.008                        |

3.2 有风井隧道数值验证

经计算竖井水力直径为  $d_l = 16\text{ m}$ ,局部阻力系数<sup>[2]</sup>如下: $\eta_{12} = \eta_{72} = 0.5, \eta_{56} = 0.1, \eta_{58} = 0.9$ ,另计算得到  $K_3 = 1.148, K_4 = 0.594, K_5 = 14.660, K_6 = 3.436$ . 现将上述参数代入到式(21)中,解得

$$v = \frac{\sqrt{3.436 \times (1.148 + 0.594 + 14.660) - 3.436}}{1.148 + 0.594 + 14.660 - 3.436} \times 22.22 = 6.978\text{ m/s}.$$

将有风井隧道的相关数据输入到环控软件 SES 中,可得列车以  $22.22\text{ m/s}$  的速度在有风井隧道中匀速行驶时,活塞风速为  $6.815\text{ m/s}$ ,此结果与本文计算结果相差不大. 有风井与无竖井隧道内活塞风速近似相等,但经过风井 5~8 排出的风量接近占据总排风量的 50%,所以说竖直风井的设置可很好地达到了最初排风降压的作用.

3.3 风井隧道内不同工况下风速变化规律

分别使用理论模型和 SES 软件仿真计算不同车速、车长、车身表面摩擦以及不同风井长度、截面积和风井隧道内表面摩擦系数等多工况下的活塞风速,将计算结果与仿真结果分别进行拟合并对比.

1) 车速变化的影响. 车速从  $60\text{ m/s}$  变化至  $100\text{ m/s}$ ,其对比结果如图 5 所示,发现活塞风速随着列车车速增大而增大,呈正比关系,且隧道内平均活塞风速数值约为车速的  $1/3$ ,此结果与文献[3]的研究结论相一致.

2) 车长变化的影响. 列车长度  $57\text{ m}$  变化至  $171\text{ m}$ ,其对比结果如图 6 所示,列车在风井隧道内匀速行驶时,随着列车长度的增加,活塞风速也会随之增大,但车长对风速的影响程度较小.

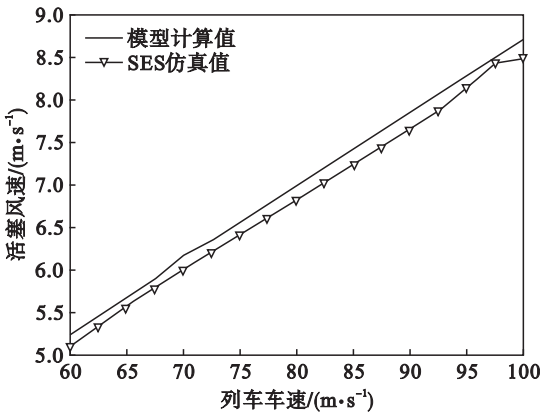


图 5 列车不同车速下活塞风速

Fig. 5 Piston wind speed vs. train speeds

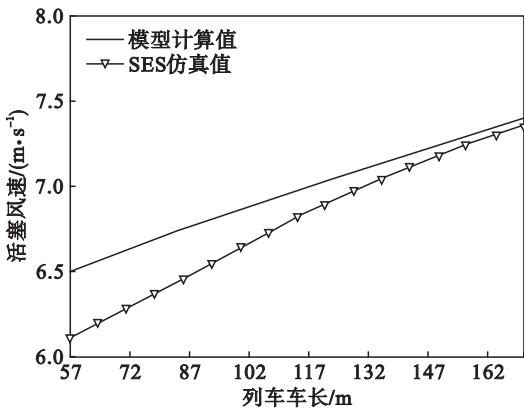


图 6 列车不同车长下活塞风速

Fig. 6 Piston wind speed vs. train length

3) 列车表面摩擦系数变化的影响. 列车表面摩擦系数  $0.005$  变化至  $0.015$ ,其对比结果如图 7 所示,随着列车表面摩擦系数的增大,活塞风速会随之增大,两者呈线性关系. 所以为避免隧道内活塞风速数值过大,可在条件允许的范围内尽可能降低列车表面的粗糙度.

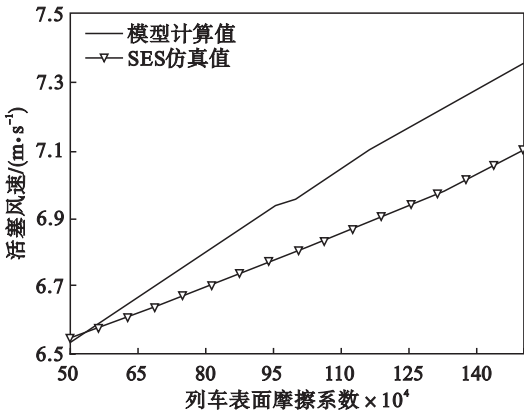


图 7 列车不同表面摩擦系数下活塞风速

Fig. 7 Piston wind speed vs. train surface roughness

4) 风井截面积和长度变化的影响. 风井截面积从  $9\text{ m}^2$  变化至  $25\text{ m}^2$ ,其对比结果如图 8 所示. 风井长度从  $15\text{ m}$  变化至  $25\text{ m}$ ,其对比结果如图 9 所示. 可发现风井截面积和风井长度两参数变化均对活塞风速影响均很小.

5) 两侧隧道长度变化的影响. 风井两侧隧道长度从  $250\text{ m}$  变化至  $1\,500\text{ m}$ ,其对比结果如图 10 所示,风井两侧隧道长度的变化也可以认为是风井位置的变化,发现随着风井侧边长度增大,活塞风速数值在减小,也就是说风井增多(风井之间距离变小),活塞风速会变大.

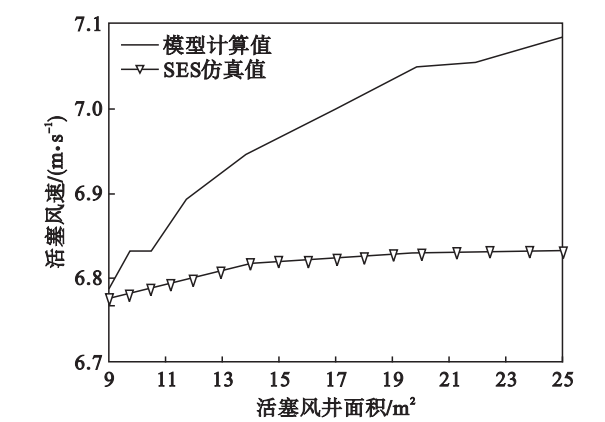


图8 列车各风井截面积下活塞风速  
Fig. 8 Piston wind speed vs. air shaft cross-section area

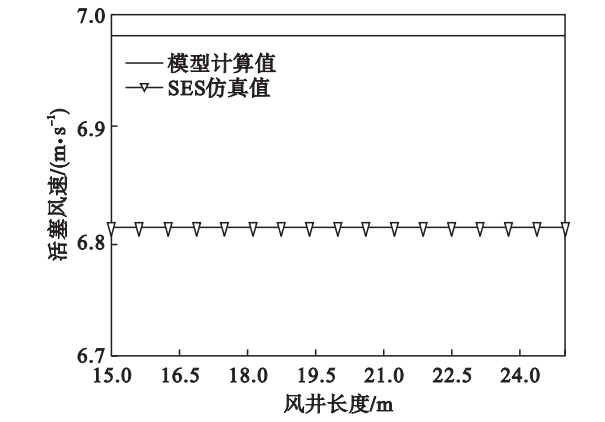


图9 列车不同风井长度下活塞风速  
Fig. 9 Piston wind speed vs. air shaft length

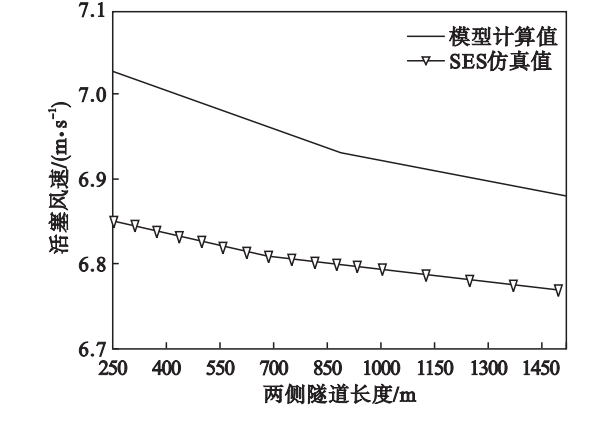


图10 列车不同两侧隧道长度下活塞风速  
Fig. 10 Piston wind speed vs. side tunnel length

## 4 结 论

1) 针对无风井隧道匀速行驶以及带风井隧道匀速行驶的两种主要地铁运行工况,推导了理论计算模型,并与专业软件和参考文献进行了对比,验证了其具有较好的准确性,其可用于实际工程中活塞风速的简便计算。

2) 带风井的隧道内,列车在行驶过程车速的快慢很大程度上决定活塞风速的大小,当车速增大一倍时,活塞风速也会增大一倍。

3) 车长的变化影响活塞风列车与隧道之间环隙区域的空气流量,当车长越长时,环隙区域的流量也会增大,造成活塞风速的增大;列车表面摩擦系数的增大,活塞风速增大,所以为避免隧道内活塞风数值过大,可在条件允许的范围内尽可能降低列车表面的粗糙度。

4) 带风井隧道,活塞风井长度,截面积以及位置的变化对于隧道活塞风速的影响并不大。

## 参考文献:

[1] Moreno T, Pérez N, Reche C, et al. Subway platform air quality: assessing the influences of tunnel ventilation, train piston effect and station design [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 92: 461–468.

[2] 金学易, 陈文英. 隧道通风及空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.  
(Jin Xue-yi, Chen Wen-ying. Tunnel ventilation and tunnel aerodynamics[M]. Beijing: Chinese Railway Press, 1983.)

[3] 王丽慧. 地铁活塞风与地铁环控节能[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
(Wang Li-hui. The piston action wind and the subway energy saving[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.)

[4] Lin C J, Chuah Y K, Liu C W. A study on underground tunnel ventilation for piston effects influenced by draught relief shaft in subway system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(5/6): 372–379.

[5] Yuan F D, You S J. CFD simulation and optimization of the ventilation for subway side-platform [J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2007, 22(4): 474–482.

[6] González M L, Vega M G, Oro J M F, et al. Numerical modeling of the piston effect in longitudinal ventilation systems for subway tunnels [J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2014, 40(2): 22–37.

[7] Juraeva M, Ryu K J, Jeong S H, et al. Effect of guide vanes on recovering uniform flow in a ventilation duct in an existing twin-track subway tunnel [J]. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 2015, 29(1): 251–258.

[8] Leung A W H, Cheung E K Y. Design of the tunnel ventilation system for the western Harbor crossing [C]//10th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Boston, 2000: 887–911.

[9] Wittig B. Design of a scale model to evaluate the dispersion of biological and chemical agents in a NYC subway station [R]. New York: Safety & Security, 2011.

[10] Transit Development Corporation. Subway environmental design handbook, vol. II, subway environmental simulation computer program, version 4, part 1 [M]. Washington D C: User's Manual, 1997.

[11] 王明昇. 地下区间联络通道防火门设计探讨[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(4): 116–119.  
(Wang Ming-sheng. Discussion on design of fire door of underground connection passage [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2013, 30(4): 116–119.)