

## 轨道交通单竖井隧道环境的空气湍流折射率结构常数模型及分析

赵恒凯<sup>\*①②</sup> 付新涛<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(上海大学通信与信息工程学院 上海 200444)

<sup>②</sup>(上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室 上海 200072)

**摘要:** 空气湍流的变化影响微波的传输。为了研究轨道交通隧道环境下空气湍流对微波传输的影响,该文结合活塞风的运动特性以及大气折射率结构常数的计算方法,建模隧道环境温度、隧道长度、阻塞比、活塞风速等参数对折射率结构常数的影响,构建轨道交通单竖井隧道环境下的空气湍流折射率结构常数模型;基于实际隧道温度场景,分析了轨道交通隧道环境下折射率结构常数的分布规律,比较了列车经过有单竖井和无单竖井的隧道时,空气湍流折射率结构常数的变化。该模型为研究轨道交通隧道环境中电波折射率结构常数提供理论参考。

**关键词:** 空气湍流; 微波; 折射率结构常数; 单竖井隧道; 活塞风

中图分类号: U231.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)04-0887-06

DOI: 10.11999/JEIT160632

## Model and Analysis of Atmospheric Turbulence Index Structure Parameter in the Single-shaft Tunnel of Rail Transit Environment

ZHAO Hengkai<sup>①②</sup> FU Xintao<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

<sup>②</sup>(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Network, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The change of the atmospheric turbulence affects the transmission of microwave. In order to study the impact of turbulence on the microwave transmission in rail transit tunnel environment, this paper combines the motion characteristics of the piston wind with the calculation method of atmospheric refractive index structure parameter. With investigation into the influences of tunnel environmental temperature, length of tunnel, blockage ratio, and piston wind speed on the atmospheric refractive index structure parameter, an atmospheric refractive index structure parameter model is established in the single-shaft rail transit tunnel environment. In this paper, the distribution of the atmospheric refractive index structure constant in rail transit tunnel environment is analyzed, and the change of atmospheric turbulence refractive index structure parameter in case of the train through the single-shaft tunnel with that of no single-shaft tunnel is compared based on the actual tunnel temperature scene. The model provides a theoretical reference for the study of radio refractive index structure constant in rail transit tunnel environment.

**Key words:** Atmospheric turbulence; Microwave; Refractive index structure constant; Single-shaft tunnel; Piston wind

### 1 引言

湍流是自然界非常普遍的流动现象,由大气环境中空气密度的无规则起伏引起的。在自由空间中,湍流的强度随着大气温湿度等参数的微小变化而出现较大浮动。空气湍流对电磁波的传输产生很大影

响。目前对于湍流折射率结构常数,国内外学者做了大量的研究,文献[1,2]通过计算地表温度、表面层的动量通量、显热通量和潜热通量,根据湍流通量和温度结构常数的经验关系式计算出近地面层湍流折射率结构常数,并通过实验进行验证;文献[3]利用K波段干涉仪测试数据计算对流层水汽含量所导致的空气折射率结构常数变化;文献[4]利用FLUENT软件模拟轨道交通环境下列车周围的压强场和温度场,通过采样得到隧道温度和压强,从而根据温度脉动法计算空气折射率结构常数;文献

收稿日期: 2016-06-15; 改回日期: 2016-12-15; 网络出版: 2017-02-24

\*通信作者: 赵恒凯 lkzhao@staff.shu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61271061, 61132003)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61271061, 61132003)

[5]提出一种通过对数光强方差、对数光强结构函数和湍流折射率结构常数的关系计算城市表层湍流折射率结构常数虚部的方法；文献[6]根据波长、链路长度、动能耗散率、每单位质量流体温度的耗散率均方、柯尔莫哥洛夫(Kolmogorov)微尺度以及温度比盐度对折射率谱的贡献等参数计算海洋湍流折射率结构常数。然而，在轨道交通隧道环境下，空气湍流对微波传输影响的研究甚少。在隧道环境中，由于受到活塞风的影响，隧道内的空气热交换是比较复杂的传热传质过程，使隧道内空气温度的变化产生不均匀性，最终形成复杂的湍流场，影响轨道交通环境的通信质量。本文结合隧道活塞风的变化，估算空气湍流折射率结构常数，对隧道湍流场中的电波传播研究有重要意义。

## 2 大气折射率结构常数模型

空气湍流折射率结构常数  $C_n^2$  是表征湍流强弱的物理量，它并非真正的常数，而是一个随时间和空间变化的物理量。折射率结构常数不仅与地面的高度有关，还与空气的温湿度、压强、风速、地形等因素有关。

根据柯尔莫哥洛夫 2/3 定律，在湍流惯性子区内，空间两点间的折射率结构函数为

$$D_n(r) = C_n^2 r^{2/3} \quad (1)$$

式中， $C_n^2$  为空气湍流折射率结构常数； $r$  为空间两点间的距离。

在近地层，文献[7]运用波文比能量平衡法(BREB)<sup>[8]</sup>，用经验公式推导出  $C_n^2$  的表达式为

$$C_n^2 = \left( \frac{C_T^2 A^2 P^2}{T^4} \right) \left( 1 + \frac{0.03}{Bo} \right)^2 \quad (2)$$

其中， $C_T^2$  为温度折射率结构常数； $T$  为气温，单位为 K； $P$  为气压，单位为 Pa； $A$  为与波长  $\lambda(\mu\text{m})$  有关的常数，在光波段  $A = 79 \times 10^{-6}$  K/hpa，在微波波段通常取  $A = 77.6 \times 10^{-6}$  K/hpa； $Bo$  为波文比，其计算公式为

$$Bo = \frac{\Delta T}{K_r \Delta q} \quad (3)$$

式中， $\Delta T$  为温度差； $\Delta q$  为湿度差； $K_r$  取  $2100 \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与光波段相比较，微波段的折射率结构常数受到湿度差以及温湿度掺混效应等因素的作用影响更加明显，为了表征这些因素的作用效果，还有其他一些不同于式(2)的微波段折射率结构常数模型，其测量方法也在文献[9]中。由于本文主要研究隧道的温度场景对于微波段折射率结构常数的作用影响，故在此采用式(2)所给出的模型。此模型的折射率结构常数只与温度、湿度、压强及波长有

关的常数  $A$  相关。在每个波段  $A$  的值是不一样的，在微波段近似为上述数值。

结合式(2)和式(3)得到

$$C_n^2 = \left( \frac{C_T^2 A^2 P^2}{T^4} \right) \left( 1 + \frac{0.03 K_r \Delta q}{\Delta T} \right)^2 \quad (4)$$

在大气边界层内范围内，文献[10]根据 Monin-Obukhov 相似性原理，通过实验给出了  $C_T^2$  的表达式

$$C_T^2 = \begin{cases} 21.8 z^{-2/3} T_*^2 (1 - 65.3 z/L)^{-2/3}, & z/L < 0 \\ 5.74 z^{-2/3} T_*^2 [1 + 1.1(z/L)^{2/3}], & z/L > 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中， $C_T^2$  为温度结构常数； $z$  为距离地面的高度； $L$  为 Monin-Obukhov 长度； $T_*$  为温度特征尺度，文献[11]中用两高度层的平均差值来代替，表示为

$$T_* = \frac{k \Delta T}{\psi_T \Delta \ln z} \quad (6)$$

式中， $k$  为卡门(Karman)常数，通常取 0.4。

根据文献[12]和文献[13]的经验公式：

$$\left. \begin{aligned} \psi_u &= [1 - 15(z/L)]^{-1/4}, & z/L < 0 \\ \psi_T &= \psi_q = [1 - 15(z/L)]^{-1/2}, & z/L < 0 \\ \psi_u &= \psi_T = \psi_q = 1 + 5(z/L), & z/L > 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中， $\psi_T$  为温度特征尺度的无量纲普适函数；Monin-Obukhov 长度  $L$  的表达式为

$$L = \frac{T(1 + 0.61q)(\Delta V)^2}{g \Delta \ln z [\Delta T + 0.61T \Delta q]} \quad (8)$$

其中， $q$  为比湿； $g$  为重力加速度。

在不稳定的大气环境条件下，结合前述式(5)-式(8)得到

$$C_n^2 = \frac{5.74 z^{-2/3} \left[ 1 + 1.1 \left( \frac{z g \Delta \ln z [\Delta T + 0.61T \Delta q]}{T(1 + 0.61q)(\Delta V)^2} \right)^{2/3} \right] (k \Delta T)^2}{\left[ \Delta \ln z \left( 1 + 5 \frac{z g \Delta \ln z [\Delta T + 0.61T \Delta q]}{T(1 + 0.61q)(\Delta V)^2} \right) \right]^2} \quad (9)$$

## 3 隧道活塞风模型

在轨道交通隧道环境中，如图 1 所示隧道内列车运行模型，由于受到隧道壁的作用，隧道中列车前方的部分空气流在列车的推动下顺着运行方向流动，从而形成活塞风。当列车突入隧道时，活塞风速随时间增大。由于地铁隧道长度远大于列车长度，一段时间后活塞风速便趋于一个稳定值，故在多数情况下，地铁隧道活塞风可按恒定流计算。为简化计算模型，这里按一个区间内仅有一列车行驶考虑，

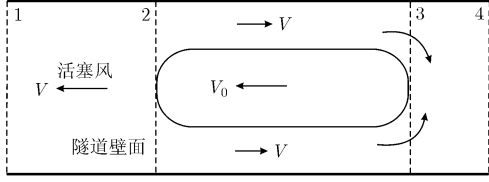


图1 隧道内列车运行模型

且只考虑计算区段前单通风竖井的作用，忽略相邻其他(前端及后端)区段及列车的影响，以及将隧道内的气流视为不压缩的流体。

列车在没有通风竖井的隧道环境中运行时，文献[14]给出了活塞风  $V$  的表达式为

$$V = \frac{V_0}{1 + \sqrt{\xi/K_\alpha}} \quad (10)$$

其中， $V_0$  为列车的运行时速， $\xi$  为隧道的总阻力系数， $K_\alpha$  为列车活塞作用系数。

隧道的总阻力系数  $\xi$  表达式为

$$\xi = \left( \xi_0 + \lambda_1 \frac{L_1 - L_0}{d} + 1 \right) \quad (11)$$

式中， $\xi_0$  为隧道洞口的局部阻力系数， $\lambda_1$  为隧道的沿程阻力系数， $L_1$  为隧道长度， $L_0$  为列车长度， $d$  为隧道的水力直径。

$$C_n^2 = \frac{5.74z^{-2/3} \left[ 1 + 1.1 \left( \frac{zg \Delta \ln z [\Delta T + 0.61T \Delta q]}{T(1 + 0.61q)(V_e - V_s)^2} \right)^{2/3} \right] (k \Delta T)^2 \left( \frac{A^2 P^2}{T^4} \right) \left( 1 + \frac{0.03K_r \Delta q}{\Delta T} \right)^2}{\left[ \Delta \ln z \left( 1 + 5 \frac{zg \Delta \ln z [\Delta T + 0.61T \Delta q]}{T(1 + 0.61q)(V_e - V_s)^2} \right) \right]^2} \quad (14)$$

#### 4 隧道区间温度分布模型

列车在隧道内运行的过程中，所产生的热量会流入到隧道内，其中一部分被列车车体和隧道壁面吸收，另一部分则传给隧道内的空气，从而导致隧道内空气温度的升高。由于隧道活塞风的作用，这些热量会随着空气流入地铁站台，影响地铁站点空调系统的负荷。图2为隧道环境中活塞风与外界空气温湿度交换模型。

考虑到隧道温度变化过程的复杂性，故在研究隧道活塞风的温度分布时，认为隧道内空气的密度是均匀分布的，为常数  $\rho$ 。文献[15]给出了隧道温度分布的推导过程，本文参考文献[16]计算围岩与气流

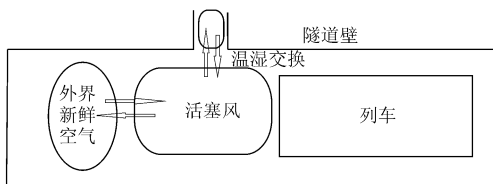


图2 隧道内活塞风与外界空气温湿度交换模型

列车活塞作用系数  $K_\alpha$  的表达式为

$$K_\alpha = \frac{N_0 L_0}{(1 - \alpha)^2} \quad (12)$$

式中， $N_0$  为列车的阻力系数，在国内环境下，一般取  $N_0 = 86 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ； $L_0$  为列车长度； $\alpha$  为阻塞比，即列车横断面积与隧道横截面积的比值。

当列车在有竖井的隧道内运行时，活塞风的大小会产生显著变化。这是因为列车经过竖井时，由于正压力，列车前方的气流有一部分会通过通风井排出；而当列车经过竖井后，由于负压力，列车尾部气流的一部分是通过竖井进来的。所以，竖井影响系数的不同，隧道活塞风的大小也不相同。列车经过竖井后，列车前方的活塞风速等于没有通风竖井时的活塞风速，如式(10)所示；列车通过竖井前，列车前方活塞风的计算式为

$$V_e = \frac{\varphi V_0}{1 + \sqrt{\xi/K_\alpha}} \quad (13)$$

式中， $\varphi$  为通风竖井的影响系数，取为 0.86。

设参考点的风速为  $V_s$ ，结合式(4)、式(9)以及式(13)，得到单竖井轨道交通隧道环境下空气湍流折射率结构常数模型为

间的传热系数。

根据能量平衡理论，单位长度的区间隧道内空气能量平衡方程为

$$\rho V_c \frac{\partial q_c}{\partial t} + C\Phi \frac{\partial T(t,x)}{\partial x} = K_h D (T_h - T(t,x)) + q_1 + q_2 \quad (15)$$

式中， $T(t,x)$  为  $t$  时刻、 $x$  位置处的空气温度； $D$  为隧道截面周长； $K_h$  为围岩与气流间的传热系数； $C$  为空气的定压比热； $\Phi$  为活塞风的质量流量； $T_h$  为定温度层处土壤的温度； $q_1$  为列车在区间隧道内单位长度的产热功率； $q_2$  为区间隧道内单位长度的照明产热功率； $\partial q_c / \partial t$  表示单位质量流体的热量变化，在隧道环境中，此项极小，故忽略不计。则式(15)可以转化为

$$C\Phi \frac{\partial T(t,x)}{\partial x} = K_h D (T_h - T(t,x)) + q_1 + q_2 \quad (16)$$

列车行驶进入区间隧道时，入口处的气流温度近似等于外界环境温度，故  $T_0(t,x) = T_0(t)$ ， $T_0(t)$  为  $t$  时刻外界环境的温度。对式(16)方程求解可以得到

$$T(t, x) = \left( T_0(t) - T_h - \frac{q_1 + q_2}{K_h D} \right) \cdot \exp\left(-\frac{K_h D}{C\Phi} x\right) + T_h + \frac{q_1 + q_2}{K_h D} \quad (17)$$

式(17)为隧道温度随时间与位置的分布表达式。

围岩与气流间的传热系数  $K_h$  计算表达式为

$$K_h = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{\delta_b}{\beta_c \lambda_c} + \frac{1.13R\sqrt{F_y}}{\beta_y \lambda_y} \left( 1 - \frac{\delta_b}{1.13R\sqrt{F_c}} \right)} \quad (18)$$

式中,  $h$  为隧道内的气流与围岩壁面间的换热系数,

$$C_n^2 = \frac{5.74z^{-2/3} \left[ 1 + 1.1 \left( \frac{zg\Delta \ln z [T(t, x) - T_0 + 0.61T(t, x)\Delta q]}{(1 + 0.61q)(V_e - V_s)^2 T(t, x)} \right)^{2/3} \right]^2 \left[ k(T(t, x) - T_0) \right]^2 \left( \frac{A^2 P^2}{T^4(t, x)} \right) \left( 1 + \frac{0.03K_r \Delta q}{T(t, x) - T_0} \right)^2}{\left[ \Delta \ln z \left( 1 + \frac{5zg\Delta \ln z [T(t, x) - T_0 + 0.61T(t, x)\Delta q]}{(1 + 0.61q)(V_e - V_s)^2 T(t, x)} \right) \right]^2} \quad (20)$$

## 5 隧道场景中的分析

为了研究轨道交通隧道环境中温度、活塞风速以及隧道内参数对微波折射率结构常数的影响, 基于上海地铁1号线部分区间隧道的参数进行分析。

上海地铁1号线于1993年开始试运营, 经过不断的发展, 目前该线全长36.89 km, 采用德国ADTranz原产、南车株洲改造的AC01a型列车。该列车以8节编组的方式, 每节车厢的长、宽、高分别为23.54 m, 3.00 m, 3.80 m, 列车长度  $L_0=188.32$  m, 设计时速为80 km/h, 列车运营时速为  $V_0=75$  km/h。地铁1号线采用地下岛式单轨道圆形隧道, 内径为5.50 m, 衬砌厚度为0.35 m<sup>[7]</sup>。取中山北路到上海火车站之间隧道作为研究对象, 该段区间隧道长  $L_1=1.37$  km, 运行时间大约120 s。

选取隧道内高度为2.00 m, 隧道的总阻力系数  $\xi = 0.5$ , 隧道的沿程阻力系数  $\lambda_1 = 0.025$ 。图3给出了不同温度下折射率结构常数与活塞风速之间的变化关系。

从图3中可以看出, 隧道环境中微波折射率结构常数随着活塞风速的增加而呈现递增趋势, 而且递增趋势逐渐放缓。这是因为, 随着活塞风速的增大, 隧道内温湿度的变化加快, 隧道内湍流强度增强, 当风速足够大时, 折射率结构常数趋于极限。以及, 温度越大对应的折射率结构常数越大, 类似于开放空间稳定大气条件下温度对湍流折射率结构常数的影响趋势。

在轨道交通隧道环境中, 隧道长度、隧道内径、阻塞比、列车长度以及列车速度等隧道参数对活塞风速产生很大的影响。取温度  $T=298$  K, 图4是不

一般取  $5.8 \sim 8.1$  W/m<sup>2</sup>·K;  $\delta_b$  为衬砌厚度;  $\beta$  为修正系数,  $\beta_c = 1 + 0.38\sqrt{F_c}$ ,  $\beta_y = 1 + 0.38\sqrt{F_y}$ ;  $\lambda_c$  为衬砌材料的导热系数;  $\lambda_y$  为岩体材料的导热系数。而  $F_y, F_c$  为傅里叶准则

$$F_y = \frac{\varepsilon_y n}{R^2}, \quad F_c = \frac{\varepsilon_c n}{R^2} \quad (19)$$

其中,  $n$  为通风时间;  $R$  为当量半径;  $\varepsilon_c$  为衬砌材料的导温系数;  $\varepsilon_y$  为岩体材料的导温系数。

在轨道交通隧道环境中, 结合式(14), 式(17)得到隧道环境中折射率结构常数的分布模型

同隧道长度下折射率结构常数与列车速度之间的变化关系。

从图4中可以看出, 隧道环境中微波折射率结构常数随着列车速度的增加而增加, 当增加到一定程度时趋于极限, 这是因为, 活塞风速与列车速度成正比关系。并且, 隧道长度越大, 折射率结构常数也越大, 但变化不大, 故隧道长度的微小变化对折射率结构常数的影响并不明显。

轨道交通隧道环境下, 阻塞比影响活塞风速的大小。图5是不同列车长度下折射率结构常数与阻塞比之间的变化关系。

从图5中可以看出, 不同列车长度的折射率结构常数均随着阻塞比的增加而增加; 当阻塞比达到最大的时候, 折射率结构常数趋于极限值, 且随着列车长度的增加而增加。实际隧道中, 阻塞比不可能取两个极端值, 但是通过仿真分析可以看到, 当阻塞比取两个极端值时, 折射率机构常数的变化符合客观实际。

一般情况下, 轨道交通隧道竖井的设计是为了解决隧道通风的问题。图6为有单竖井和没有单竖井的隧道环境下折射率结构常数与温度之间的变化关系。

从图6中可以看到, 当温度很小的时候, 有通风竖井和没有通风竖井时的折射率结构常数基本上一致, 但当温度升高时, 两者的差异越来越明显。

为了研究轨道交通隧道环境中折射率结构常数的分布, 通过实地考察可知, 地铁1号线衬砌材料为钢筋混凝土, 其导热系数为  $\lambda_c = 2.5$  W/(m·K), 导温系数  $\varepsilon_c = 6.45 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s; 基岩为轻质黏土, 其

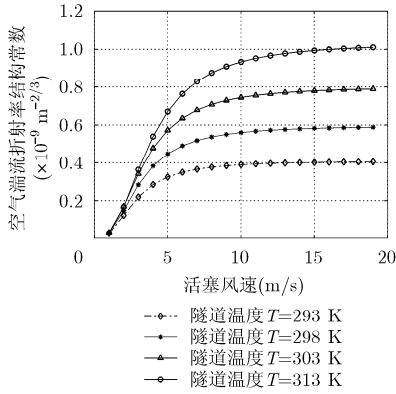


图 3 不同温度下折射率结构常数和活塞风速的关系

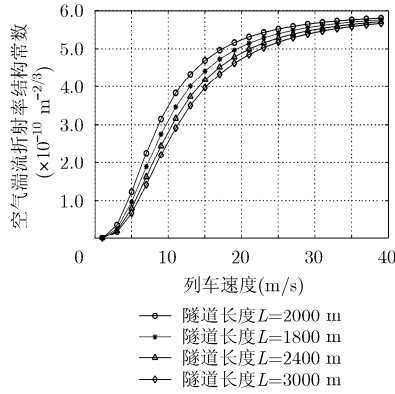


图 4 不同隧道长度下折射率结构常数和车速的关系

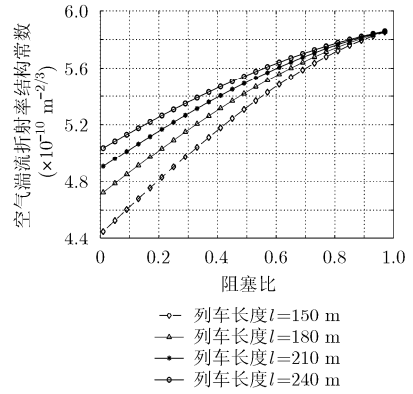


图 5 不同列车长度时折射率结构常数和阻塞比的关系

导热系数  $\lambda_y = 1.4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，导温系数  $\epsilon_c = 7.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ，经过计算得到围岩与气流间的传热系数  $K_h = 0.318 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 根据文献[18]计算得出，区间隧道内单位长度的产热功率为  $22811.5 \text{ W}/\text{m}$ 。

外界环境的温度  $T_0(t)$ 是一个随时间变化量，考察某一时刻  $T_0(t)=299 \text{ K}$ 。图 7 给出了隧道内大气折射率结构常数与位置的变化关系。

从图 7 中可以看到，随着距离的增加，折射率结构常数呈现先增后减的趋势。从图 2 隧道内活塞风与外界空气温湿度交换模型中可以看出，在列车运行方向上，活塞风边界与外界新鲜空气的热湿交换比较明显，在 16 m 位置呈现最大值，所以此刻活塞风的长度约为 16 m。随着距离的增加，超过活塞风长度的热湿交换强度下降，故折射率结构常数呈现下降趋势，且最终达到一个定值。

### 6 结论

在自由空间中，温、湿度的变化是影响湍流的两个重要因素；在隧道环境中，受活塞风的影响，隧道温湿度的变化呈现很大的不均匀性，从而形成复杂的湍流场。本文根据空气湍流折射率结构常数的估算模型，结合活塞风的运动特性，运用 Monin-obukhov 相似性原理，以及经验参数得到单竖井隧

道环境下空气湍流折射率结构常数模型。分析研究了温度、活塞风速、阻塞比、列车长度以隧道长度对空气湍流折射率结构常数的影响。可知，轨道交通隧道环境下空气湍流折射率结构常数的数量级在  $10^{-10} \sim 10^{-9}$  之间。

(1)在近地层 0~25 m 处，自由空间稳定大气环境下的空气湍流折射率结构常数范围为  $10^{-19} \sim 10^{-14}$  之间；而在复杂隧道环境下，温湿度的变化更加剧烈，空气湍流折射率结构常数能够达到  $10^{-10} \sim 10^{-9}$ ，差异显著。

(2)隧道环境下空气湍流折射率结构常数受活塞风的影响较大。温度较低时，单竖井的通风作用对空气湍流折射率结构常数的影响并不明显；当温度较高时，这种影响越来越显著。在轨道交通隧道环境中，通风竖井不但能够起到通风作用，而且能够降低湍流对电波传播的影响。

(3)在轨道交通隧道环境中，活塞风与外界空气的交界层处的空气湍流折射率结构常数值达到最大；而离列车越近，折射率结构常数的值越小。

空气折射率结构常数会受到各种实际工程因素的影响，为了测量其波动变化的准确性，可以采用电波传播和气象参数探测相结合的方法：利用微波收发信机检测折射率结构常数波动的同时，采用气

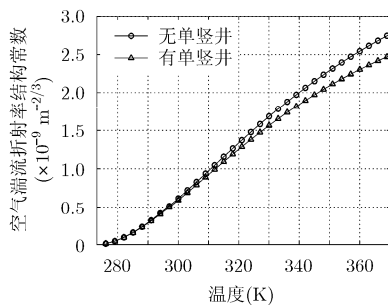


图 6 有单竖井和没有单竖井的隧道环境下折射率结构常数和温度的关系

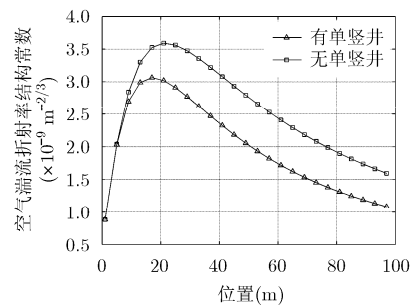


图 7 大气折射率结构常数随位置的分布曲线

象传感器的空间分布阵列来探测温度、活塞风速、湿度等参数的变化,再运用本文的折射率结构模型进行比较。

### 参考文献

- [1] 吴晓庆,王英俭,曾宗泳,等.一维大气边界层光学折射率结构常数的数值模式[J].强激光与粒子束,2002,14(6):819-822. WU Xiaoqing, WANG Yingjian, ZENG Zongyong, *et al.* Numerical model of atmospheric optical refractive index structure parameter[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(6): 819-822.
- [2] LI Yujie, ZHU Wenyue, and WU Xiaoqing. Equivalent refractive-index structure constant of non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23004-23012. doi: 10.1364/OE.23.023004.
- [3] NESSEL J A and MANNING R M. Derivation of microwave refractive index structure constant ( $C_n^2$ ) of the atmosphere from K-band interferometric phase measurements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(11): 5590-5598. doi: 10.1109/TAP.2014.2347997.
- [4] 张永静,赵东东.基于 FLUENT 测轨道交通隧道中电波折射率结构常数[J].上海大学学报(自然科学版),2014,20(4):458-465. doi: 10.3969/j.issn.1007-2861.2013.07.031. ZHANG Yongjing and ZHAO Dongdong. Structure parameter estimation of radio wave refractive index in rail transit tunnel based on FLUENT[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2014, 20(4): 458-465. doi: 10.3969/j.issn.1007-2861.2013.07.031.
- [5] YUAN R, LUO T, SUN J, *et al.* A new method for measuring the imaginary part of the atmospheric refractive index structure parameter in the urban surface layer[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2015, 15(5): 2521-2531. doi: 10.5194/acp-15-2521-2015.
- [6] BAYKAL Y. Expressing oceanic turbulence parameters by atmospheric turbulence structure constant[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(6): 1228-1231. doi: 10.1364/AO.55.001228.
- [7] KUNKEL K E and WALTERS D L. Modeling the diurnal dependence of the optical refractive index structure parameter[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1983, 88(C15): 10999-11004. doi: 10.1029/JC088iC15p10999.
- [8] 宋从和.波文比能量平衡法的应用及其误差分析[J].河北林果研究,1993,8(1):85-96. SONG Conghe. The application of Bowen Ratio-energy balance method and error analysis[J]. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 1993, 8(1): 85-96.
- [9] MANNING ROBERT M and VVHNALEK B. A microwave radiometric method to obtain the average path profile of atmospheric temperature and humidity structure parameters and its application to optical propagation system assessment [C]. Conference on Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVII, San Francisco, CA, USA, 2015: 539-545. doi: 10.1117/12.2080258.
- [10] 蔡俊,吴晓庆,李学彬,等.大气光学湍流估算模式及其相似性函数[J].强激光与粒子束,2016,28(7):1-5. doi: 10.11884/HPLPB201527.071002. CAI Jun, WU Xiaoqing, LI Xuebin, *et al.* Estimation model of atmospheric optical turbulence and its similarity functions [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(7): 1-5. doi: 10.11884/HPLPB201527.071002.
- [11] TUNICK A. CN2 model to calculate the micrometeorological influences on the refractive index structure parameter[J]. *Environmental Modeling & Software*, 2003, 18(2): 165-171. doi: 10.1016/S1364-8152(02)00052-X.
- [12] DYER A J. A review of flux-profile relationships[J]. *Boundary-Layer Meteorol*, 1974, 7(3): 363-372. doi: 10.1007/BF00240838.
- [13] HICKS B B. Wind profile relationships from the 'wangara' experiment[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1976, 102(433): 535-551. doi: 10.1002/qj.49710243304.
- [14] 陈文英,聂厚显.有竖井隧道的列车活塞风计算公式的探讨[J].铁道标准设计通讯,1981(4):15-19. doi: 10.13238/j.issn.1004-2954.1981.04.005. CHEN Wenyong and NIE Houxian. Discussion on calculation formula of piston wind in a train with shaft tunnel[J]. *Railway Standard Design*, 1981(4): 15-19. doi: 10.13238/j.issn.1004-2954.1981.04.005.
- [15] 曾臻,匡亚迪,龚冀杰,等.地铁区间隧道空气温特性研究[C].2014铁路暖通年会论文集,上海,2015:147-156. ZENG Zhen, KUANG Yadi, GONG Mingjie, *et al.* The analyzing of temperature distribution in the metro tunnel [C]. Proceedings of the 2014th Railway HVAC Annual Conference, Shanghai, 2015: 147-156.
- [16] 胡汉华,吴超,李茂楠.地下工程通风与空调[M].长沙:中南大学出版社,2005:1-281. HU Hanhua, WU Chao, and LI Maonan. *Underground Engineering Ventilation and Air Conditioning*[M]. Changsha: Central South University Press, 2005: 1-281.
- [17] 朱祖熹.上海地铁1号线盾构隧道衬砌防水技术述评[J].地下工程与隧道,1993(4):54-60. doi: 10.13547/j.cnki.dxcgcsd.1993.04.012. ZHU Zuxi. Review on waterproof technology of shield tunnel lining in Shanghai Metro Line 1[J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 1993(4): 54-60. doi: 10.13547/j.cnki.dxcgcsd.1993.04.012.
- [18] 龚伟,沈凯,吴喜平.地铁列车运行区间隧道热负荷分析[J].地下工程与隧道,2011(3):31-34. doi: 10.13547/j.cnki.dxcgcsd.2011.03.003. GONG Wei, SHEN Kai, and WU Xiping. Analysis of heat load in subway running tunnel[J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 2011(3): 31-34. doi: 10.13547/j.cnki.dxcgcsd.2011.03.003.

赵恒凯: 男,1968年生,副教授,研究方向为无线通信、电波传播。

付新涛: 男,1990年生,硕士生,研究方向为无线通信、电波传播。