

文章编号: 1671-6612 (2026) 04-609-06

基于污染物控制的隧道纵向通风限制长度研究

陈 琛¹ 李宝华² 唐 莎^{1,3}

(1. 中交公路规划设计院有限公司 北京 100010;

2. 云南临沧临清高速公路有限公司 临沧 677000;

3. 西南交通大学 成都 610031)

【摘 要】 为解决公路隧道纵向通风方式下污染物超标问题,为隧道设计提供科学的长度限值参考,研究以纵向通风隧道日常运营工况为研究背景,以 CO 和能见度(VI)为通风控制核心指标,重点围绕 CO 浓度限值开展研究。通过建立隧道内污染物扩散数学模型与风速动力学计算模型,推导交通风力、自然风作用力、隧道摩擦阻力及射流风机推力的计算方法,结合污染物浓度与隧道长度的线性分布特征,提出基于迭代法的隧道纵向通风限制长度计算方法,并验证了假定初始隧道长度对迭代结果的无关性。以云南临沧至清水河高速公路大兴乡隧道为工程案例,计算不同设计交通量与车速下的隧道最大限制长度,结果表明隧道最大设计长度与设计交通量成反比,与设计车速成正比。研究提出的计算方法可为超长公路隧道的设计与运营通风规划提供理论依据和工程参考。

【关键词】 公路隧道;纵向通风;限制长度;CO 浓度;迭代法;污染物扩散

中图分类号 U453.5 文献标志码 A

Study on the Length Limit of Longitudinal Ventilation Tunnels Based on Pollutant Control

Chen Chen¹ Li Baohua² Tang Sha^{1,3}

(1. CCCC Highway Consultants Co., Ltd, Beijing, 100010;

2. Yunnan Lincang Linqing Highway Co., Ltd, Lincang, 677000;

3. Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 To solve the problem of excessive pollutants in highway tunnels utilizing longitudinal ventilation systems and provide a scientific reference for the length limit in tunnel design, this study takes the normal operation of tunnels with longitudinal ventilation as the research background, adopts CO and visibility (VI) as the core indicators for ventilation control, and focuses on the limit of CO concentration. By establishing a mathematical model of pollutant diffusion and a dynamic calculation model of wind speed in tunnels, the calculation methods for traffic wind force, natural wind force, tunnel frictional resistance and jet fan thrust are deduced. Combined with the linear distribution characteristics of pollutant concentration and tunnel length, a calculation method for the limiting length of tunnel longitudinal ventilation based on the iterative method is proposed, and the independence of the assumed initial tunnel length from the iterative results is verified. Taking Daxingxiang Tunnel on the Lincang-Qingshuihe Expressway in Yunnan Province as an engineering case, the maximum limiting length of the tunnel under different design traffic volumes and design speeds is calculated. The results show that the maximum design length of the tunnel is inversely proportional to the design traffic volume and directly proportional to the design speed. The calculation method proposed in this study can provide a theoretical basis and engineering reference for the design and operational ventilation planning of extra-long highway tunnels.

【Keywords】 Highway tunnel; Longitudinal ventilation; Limiting length; CO concentration; Iterative method; Pollutant diffusion

0 引言

公路隧道作为道路的重要组成部分,其运营环境的安全性直接影响行车安全。汽车在隧道内行驶时会产生 CO、VI、NO_x等污染物,若不能及时有效排出,将导致污染物在隧道内累积。其中 CO 作为有毒气体,与血液中血红蛋白(HB)结合形成 COHb,会降低血液携氧能力,引发驾驶人员视力、注意力下降,严重时还会出现眩晕、恶心等症状,极易诱发交通事故。因此,控制隧道内污染物浓度,尤其是 CO 浓度,是隧道运营通风设计的核心要求,而确定合理的隧道限制长度,是防止污染物浓度超标的关键举措。

国内外针对隧道内 CO 浓度设计限值已形成一系列规范与标准:1971 年世界道路协会推荐隧道正常运营时 CO 浓度设计限值为 150ppm;1991 年提出暴露时间 15min 时 CO 浓度限值为 125ppm;1995 年 PIARC 将 CO 浓度设计限值规定为 100ppm^[1]。我国隧道通风规范也历经多次修订,1999 年《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1-1999)^[2]根据隧道长度和通风方式划分了不同的 CO 浓度限值,2014 年《公路隧道设计规范第二册交通工程与附属设施》(JTGT D70/2-2014)^[3]进一步收紧限值,明确短隧道(L<1000m)CO 设计浓度限值为 150ppm,长隧道(L>3000m)为 100ppm。

目前隧道内污染物分布受交通量、风速、隧道结构等多因素综合影响,对于超长隧道,现有研究尚未形成通用的纵向通风限制长度计算方法。基于此,本研究综合考虑交通量、风机参数、隧道结构参数等影响因素,建立隧道污染物扩散与空气动力学耦合模型,提出迭代法求解隧道纵向通风限制长度的通用方法,并结合工程案例验证方法的可行性,以期公路隧道的设计与运营提供参考。

1 研究方法

本研究以公路隧道正常运营为前提,以 CO 和 VI 为隧道运营通风控制目标,并将 CO 浓度作为核心控制指标。首先基于流体力学与污染物扩散理论,建立隧道内污染物扩散偏微分方程与风速动力

学计算模型,推导交通风、自然风、隧道摩擦阻力及射流风机推力的定量计算方法;其次分析隧道内污染物浓度与隧道长度的空间分布特征,确定二者的线性关系;最后提出基于迭代法的隧道限制长度计算方法,通过验证假定初始隧道长度对计算结果的无关性,保证迭代过程的准确性,并制定标准化的计算流程。同时,以实际工程隧道为案例,输入设计参数计算不同交通量、车速下的隧道最大限制长度,分析交通量与车速对隧道限制长度的影响规律。

2 计算模型建立

隧道内污染物浓度与风速密切相关,风速由交通风、自然风、射流风机推力和隧道摩擦阻力共同决定,因此本研究分别建立污染物扩散模型与风速计算模型,为隧道限制长度计算奠定理论基础。

2.1 污染物扩散模型

隧道内污染物的时空分布满足对流-扩散方程,其通用表达式为:

$$\frac{\partial \phi(x,t)}{\partial t} + v_r \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial x} = D \frac{\partial^2 \phi(x,t)}{\partial x^2} + S(x,t) \quad (1)$$

式中: ϕ 为任意时刻 t 距离隧道入口 x 处的污染物浓度,当污染物为 CO 时单位为 ppm,为 VI 时单位为 m⁻¹;D 为紊流扩散系数, m²/s; S 为污染物源项。

2.2 风速计算模型

隧道内风速是交通风压力、射流风机推力、隧道摩擦阻力及自然风压力共同作用的结果,参考《公路隧道通风设计细则》^[4]JTG/T D70/2-02-2014(以下简称《细则》),其动力学基本方程为:

$$\frac{dV_r}{dt} = \frac{F(t)}{M} \quad (2)$$

$$F(t) = \sum \Delta p_j + \Delta p_t - \Delta p_\lambda - \Delta p_w \quad (3)$$

$$M = A_r L \rho \quad (4)$$

式中: V_r 为隧道内风速, m/s; $\sum \Delta p_j$ 为射流风机推力, N/m²; Δp_t 为交通通风力, N/m²; Δp_λ 为隧道摩擦阻力, N/m²; Δp_w 为自然风阻力, N/m²; $F(t)$ 为上述各力的合力, N/m²; A_r 为隧道净空面积, m²; L 为隧道长度, m; ρ 为空气密度, kg/m³。

2.2.1 交通风力计算

参考《细则》,单台隧道中,车辆行驶挤压空气形成的交通风力计算公式^[3]为:

$$\Delta p_t = \pm \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n \cdot (V_t - V_r)^2 \quad (5)$$

式中: Δp_t 为交通风力, N/m^2 ; n 为隧道内车辆数, 辆; V_t 为车速, m/s ; V_r 为隧道内风速, m/s ; A_m 为汽车等效阻抗面积, m^2 ; A_r 为隧道净空面积, m^2 ; 当 $V_t > V_r$ 时, Δp_t 取“+”; 反之, 取“-”。

其中汽车等效阻抗面积^[3]可按式(6)计算:

$$A_m = (1 - r_l) \cdot A_{cs} \cdot \xi_{c1} + r_l \cdot A_{cl} \cdot \xi_{c2} \quad (6)$$

式中: A_{cs} 为小型车正面投影面积, m^2 , 取 2.13m^2 ; A_{cl} 为大型车正面投影面积, m^2 , 取 5.37m^2 ; r_l 为大型车比例; ξ_{c1} 为隧道内小型车或大型车的空气阻力系数。

其中空气阻力系数^[3]可按式(7)计算:

$$\xi_{ci} = 0.076x_i + 0.35 \quad (7)$$

式中: x_i 为第 i 种车型在隧道的占机率, %。

2.2.2 自然风作用力计算

自然风引起的洞内风速在缺乏现场调研的情况下, 可取 $2 \sim 3\text{m/s}$, 研究按反向风 2.5m/s 计算, 自然风阻力计算公式^[3]为:

$$\Delta p_w = \left(\xi_{in} + \xi_{out} + \lambda \frac{L}{D_r} \right) \frac{\rho}{2} V_w^2 \quad (8)$$

式中: Δp_w 为自然风阻力, N/m^2 ; V_w 为隧道自然风风速, 取 2.5m/s ; ξ_{in} 、 ξ_{out} 为隧道入口和出口局部阻力系数, 分别取 0.5 和 1.0 ; ρ 为空气密度, 取 1.20kg/m^3 ; D_r 为隧道当量直径, m , $D_r = \frac{4 \times A_r}{\text{隧道断面周长}}$; λ 为隧道壁面沿程摩擦阻力损失系数。

2.2.3 隧道摩擦阻力计算

气流在隧道内流动产生的摩擦阻力包括沿程阻力和局部阻力, 总阻力计算公式^[3]为:

$$\Delta p_\lambda = \left(\xi_{in} + \xi_{out} + \lambda \frac{L}{D_r} \right) \frac{\rho}{2} V_r^2 \quad (9)$$

式中: Δp_λ 为隧道摩擦阻力, N/m^2 。

2.2.4 射流风机推力计算

射流风机推力与隧道内风速、风机送风速度的

相对大小相关, 单台射流风机升压力计算公式^[3]为:

$$\Delta p_j = \rho \cdot V_j^2 \cdot \frac{A_j}{A_r} \cdot \left(1 - \frac{V_r}{V_j} \right) \cdot \eta \quad (10)$$

式中: Δp_j 为单台射流风机升压力, N/m^2 ;

V_j 为射流风机出口风速, m/s ; A_j 为射流风机出口面积, m^2 ; η 为射流风机位置摩阻折减系数, 当隧道断面布置两台及以上风机时可取 0.7 。

3 隧道长度限制计算

基于污染物扩散模型与风速计算模型, 结合隧道内污染物浓度的空间分布特征, 采用迭代法求解隧道纵向通风限制长度, 并通过验证初始长度的无关性保证计算精度, 同时制定标准化计算流程。

3.1 污染物浓度与隧道长度的关系

公路隧道纵向通风方式下运营期间污染物分布呈线性特征, 出口处污染物浓度达到最高^[3], 隧道长度方向的污染物浓度分布近似满足:

$$\Delta \varphi(x) = k \cdot x \quad (11)$$

式中: $\varphi(x)$ 为隧道长度方向污染物浓度; k 为污染物分布函数斜率。

由式(11)可知, 污染物浓度与隧道长度成线性正相关, 无法通过解析解直接确定二者的定量关系, 需通过数值解计算特定风速、车流量、车速下的 k 值, 再结合污染物设计浓度限值, 求解隧道限制长度。

3.2 迭代法求解原理

本研究采用迭代法求解隧道最大限制长度, 核心思路为: 通过假设初始隧道长度, 计算污染物浓度及分布函数斜率 k , 结合污染物浓度限值得到隧道初步限值; 将初步限值替代初始长度重新计算, 判断污染物浓度是否满足限值要求, 若满足则为最终隧道限值, 若不满足则重复计算, 直至结果收敛。

3.3 假定初始隧道长度的无关性验证

迭代计算前需验证假定初始隧道长度对计算结果的影响, 以排除假设因素干扰。将初始隧道长度在 $3000 \sim 8000\text{m}$ 范围内变化, 固定其他计算参数, 计算隧道最大限制长度。图1为隧道限制长度与假定初始隧道长度关系图, 由图可知, 在 $3000 \sim 8000\text{m}$ 范围内大范围改变假定初始隧道长度时, 隧道最大限值计算结果基本保持不变, 即假定初始长

度对迭代结果无影响,有效保证了迭代法的计算准确性。

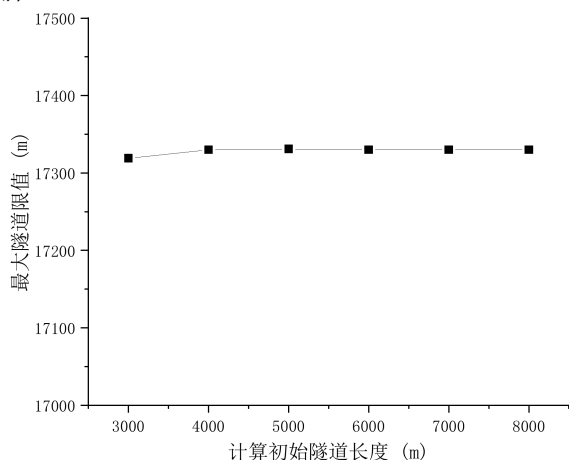


图1 隧道限制长度与假定初始隧道长度关系图

Fig.1 Relationship between tunnel limiting length and assumed initial tunnel length

3.4 标准化计算流程

基于迭代法的隧道限制长度计算流程如图2所示:

- (1) 输入基础参数,包括设计交通量、设计车速、隧道结构参数、风机参数等;
- (2) 输入假定隧道长度 L (经无关性验证,建议取 5000m);
- (3) 将参数代入耦合模型,分别计算满足 CO 、 VI 浓度限值的分布函数斜率 k 值;
- (4) 结合式 (11), 分别计算 CO 、 VI 浓度限值下的隧道长度,取最小值为隧道初步限值;
- (5) 将隧道初步限值替代假定隧道长度,重新代入模型计算,判断 CO 、 VI 浓度是否满足限值要求:若满足,输出该限值为最终隧道限制长度;若不满足,返回步骤3重新计算;
- (6) 结束循环,输出最终结果。

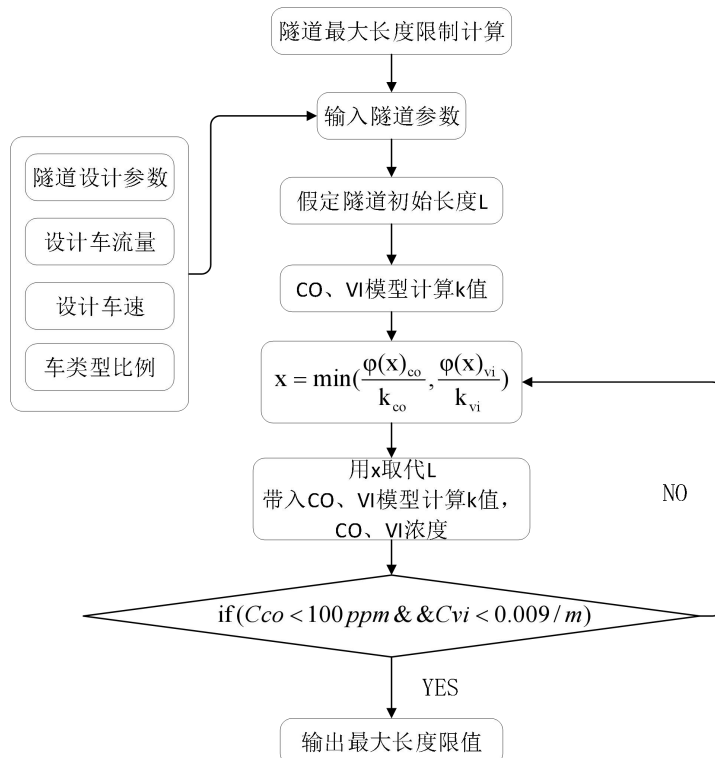


图2 隧道最大长度计算限制计算流程图

Fig.2 Flowchart for calculation of maximum limiting length of tunnel

4 计算案例

为验证本研究提出的隧道纵向通风限制长度计算方法的可行性,以云南临沧至清水河高速公路大兴乡隧道为工程案例,开展不同设计交通量、车速下的隧道最大限制长度计算,案例计算结果仅为

特定参数下的参考,不可直接作为隧道设计依据。

4.1 隧道基础设计参数

本次案例的隧道设计参数如下:隧道设计断面积 65.13m^2 ;公路等级为高速公路隧道;设计车速 80km/h ;基础设计车流量 683辆/h ;电车比例 0% ;

海拔高度 400m; 车辆类型比例(柴油机、小客车、轻型货车、中型货车、大型客车-拖挂车)为 0.22; 0.22; 0.1096; 0.1514; 0.29; 柴油车车型比例(小客车、轻型货车、中型货车、大型客车-拖挂车)为 0.44; 0.11; 0.29; 0.15。

4.2 计算限值与参数取值

根据《公路隧道设计规范第二册交通工程与附属设施》(JTGTD 70/2-2014), 取 CO 最大浓度

限值 100ppm, 烟雾(VI)最大浓度限值 0.009/m; 隧道内允许最大风速 10m/s, 本次计算取最大风速为设计风速。

4.3 案例计算结果

改变隧道设计交通量(500~2500 辆/h)与设计车速(60、80、100km/h), 将相关参数代入耦合模型与迭代计算流程, 得到不同工况下的隧道最大限制长度, 具体计算结果如表 1 所示。

表 1 不同设计交通量以及不同设计车速时隧道长度最大限制计算

Table 1 Calculation of maximum tunnel length limits under different design traffic volumes and design speeds

设计车速/(km/h)	设计交通量/(辆/h)						
	500	600	800	1000	1500	2000	2500
60	13586	11322	8477	6743	4520	3352	2737
80	18218	15098	11323	9008	5989	4521	3607
100	22649	19025	14143	11274	7842	5587	4521

5 结果与讨论

5.1 隧道限制长度的影响规律

由案例计算结果可知, 在隧道结构、风机参数等其他条件不变的情况下, 公路隧道最大设计长度与设计交通量、设计车速呈现明显的相关性。

隧道最大限制长度与设计交通量成反比: 交通量越大, 隧道内车辆产生的污染物源项越大, 相同风速下污染物累积速度越快, 为保证 CO 和 VI 浓度不超限, 隧道最大限制长度需相应缩短。如设计车速 60km/h 时, 交通量从 500 辆/h 增至 2500 辆/h, 隧道限制长度从 13586m 降至 2737m, 图 3 可直观反映这一变化规律。

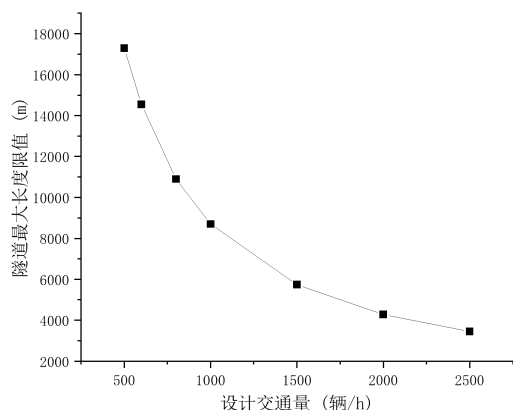


图 3 设计交通量与隧道最大长度限值关系

Fig.3 Relationship between design traffic volume and maximum tunnel length limit

隧道最大限制长度与设计车速成正比: 车速越

高, 交通风力越大, 隧道内整体风速越高, 污染物的对流扩散能力越强, 相同交通量下污染物更易排出, 隧道最大限制长度可相应增加。如交通量 800 辆/h 时, 车速从 60km/h 增至 100km/h, 隧道限制长度从 8477m 增至 14143m, 图 4 可清晰地体现不同交通量下车速对隧道最大长度限值的影响特征。

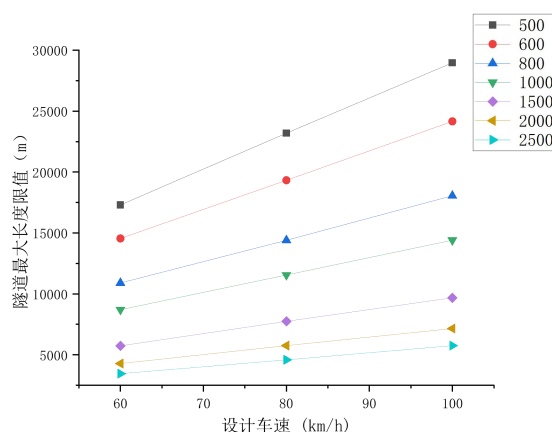


图 4 不同设计交通量时设计车速与隧道最大长度限值关系

Fig.4 Relationship between design speed and maximum tunnel length limit under different design traffic volumes

5.2 计算方法的合理性与适用性

本研究建立的污染物扩散与风速动力学耦合模型, 综合考虑了交通、风机、隧道结构、自然风等多因素对污染物浓度的影响, 符合隧道实际运营的污染物分布特征, 为隧道限制长度计算提供了可

靠的理论基础。

迭代法的求解思路有效解决了污染物浓度与隧道长度无解析解的问题,且通过验证初始隧道长度的无关性,排除了假设参数对计算结果的干扰,保证了计算精度;同时制定的标准化计算流程,可直接应用于不同工程场景的参数输入与计算,具有较强的通用性。

以实际工程隧道为案例的计算结果,量化了交通量和车速对隧道限制长度的影响,可为不同交通工况的公路隧道设计提供具体的数值参考,尤其是超长隧道的纵向通风设计,可通过本方法确定合理的长度限值,避免污染物超标。

6 结论与展望

本研究以公路隧道正常运营为背景,围绕 CO 浓度核心控制指标,开展了隧道纵向通风限制长度计算方法研究,通过建立耦合模型、提出迭代解法、结合工程案例验证,得到以下主要结论:

(1) 隧道内污染物分布成线性特征,出口处浓度最高,污染物浓度与隧道长度满足 $\varphi(x) = k \cdot x$ 的线性关系, k 值由车流量、车速、风速等参数共同决定,需通过数值解计算。

(2) 提出的迭代法可有效求解隧道纵向通风限制长度,假定初始隧道长度在 3000~8000m 范围内变化时,对迭代结果无影响,保证了计算方法的准确性;制定的六步标准化计算流程,具有较强

的工程可操作性。

(3) 工程案例计算结果表明,隧道最大限制长度与设计交通量成反比,与设计车速成正比,该规律可为公路隧道的设计交通量与车速规划提供理论依据,如交通量较大的隧道应适当缩短设计长度,或提高设计车速以增强交通风的污染物扩散能力。

(4) 本研究提出的隧道限制长度计算方法,综合考虑了交通、风机、隧道结构、自然风等多种影响因素,可为超长公路隧道的设计与运营通风规划提供科学的参考依据,对实际工程设计校验等工作具有指导意义。

(5) 本研究未考虑自然风变化、隧道内风机型号及数量改变导致的设计风速变化等因素的影响,后续可针对其开展更多对比研究。

参考文献:

- [1] PIARC. Fire and smoke control in road tunnels[R]. PIARC Technical Committee C5 Road Tunnel, 1999.
- [2] JTJ 026.1-1999,公路隧道通风照明设计规范[S].北京:人民交通出版社,1999.
- [3] JTGT D70/2-2014,公路隧道设计规范第二册交通工程与附属设施[S].北京:人民交通出版社,2014.
- [4] JTG/T D70/2-02-2014,公路隧道通风设计细则[S].北京:人民交通出版社,2014.