

特长公路隧道纵向—全横向混合通风方式研究

夏永旭 赵峰

(长安大学公路学院, 西安, 710064)

摘要: 就公路隧道的通风方式而言, 目前纵向通风形式逐渐成为主流。但是, 纵向通风也有其致命的缺点, 如分段不能太长, 防火救灾功能差, 深埋隧道中间的通风竖井太长, 施工困难等。因而对于特长公路隧道, 研究除纵向通风形式之外的各种混合通风方式显然有着重要的理论和实践意义。介绍了一种纵向—全横向混合通风方式, 并详细地推导了纵向—全横向通风计算方程, 边界条件通过配点法满足。数值算例, 证明了纵向—全横向混合通风方式在特长公路隧道通风中应用的可行性。

关键词: 特长公路隧道, 纵向—全横向, 混合, 通风。

中图分类号:U453.5

1 引言

就公路隧道的通风方式而言, 目前纵向通风形式逐渐成为主流。但是, 纵向通风也有其致命的缺点, 如分段不能太长, 防火救灾功能差, 深埋隧道中间的通风竖井太长, 施工困难等。因而对于特长公路隧道, 研究除纵向通风形式之外的各种混合通风方式显然有着重要的理论和实践意义。

作者在讨论秦岭终南山公路隧道通风方案时, 曾提出了一种纵向和半横向、全横向组合的混合通风方式^[1], 并在文献^[2]中详细地推导了纵向—半横向混合通风方式的计算方程, 通过算例研究了隧道和风道的风压及风速分布, 论证了纵向—半横向通风方式的可行性。但是, 纵向—半横向混合通风方式中半横向段的长度, 受隧道风速的限制, 即双向交通隧道风速不能大于 8.0m/s, 单向交通隧道风速不能大于 10.0m/s。这样就使得这种通风方式无法用于长度在 12.0km 以上的特长隧道。为了解决上述问题, 本文在文献^[2]的基础上, 进一步推导纵向—全横向混合式通风的计算方程, 研究其中的有关技术细节, 完善所提出的纵向和半横向、全横向混合通风的思想, 为特长公路隧道的通风方案选择开辟更为广阔的途径。

2 纵向—全横向混合通风方式

2.1 纵向—全横向混合通风的两种模式

纵向—全横向混合通风方式的指导思想, 是为了克服特长公路隧道中间段无法设置竖井的困难, 即在隧道两端采用纵向通风, 而在中间段采用全横向通风。由于全横向通风段的隧道纵向风速为零, 所以从理论上讲, 中间横向通风段可以取任意长度。考虑到一般情况, 图 1、图 2 分别给出了在单洞双向交通和双洞单向交通时, 纵向—全横向混合式通风方式的示意图。当然, 现代公路隧道的通风理念认为, 对于长大公路隧道, 应该是以双洞单向交通代替单洞双向交通^[3]。

在图 1 中, 由于是单洞双向交通, 所以纵向及横向通风均对称设置。并且为了保证在纵向通风和横向通风连接处风流便于组织, 故意使送风道的两端分别比排风道短 L_s , 这个长度至少不小于 100m, 或者应该包括 4 个排风口。当然, 更为恰当的长度, 必须通过实验或者 CFD 数值模拟确定。

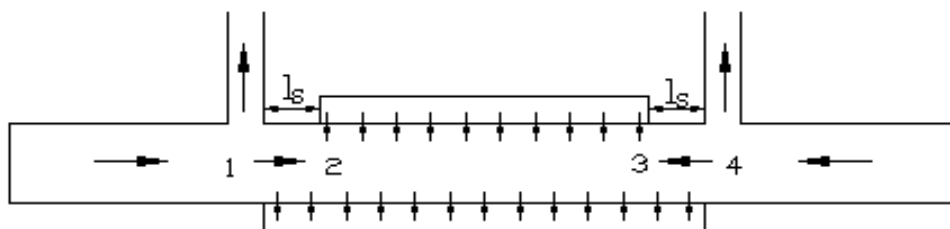


图 1 单洞双向交通混合式通风方式示意图

在图 2 的单向交通中，为了便于组织纵向通风和横向通风连接处的风流，同时也使在两端可充分地利用汽车交通风，因而故意使进口段的送风道和出口段的排风道各短 L_s ，其长度至少不小于 100m，或者应该包括 4 个送（排）风口。

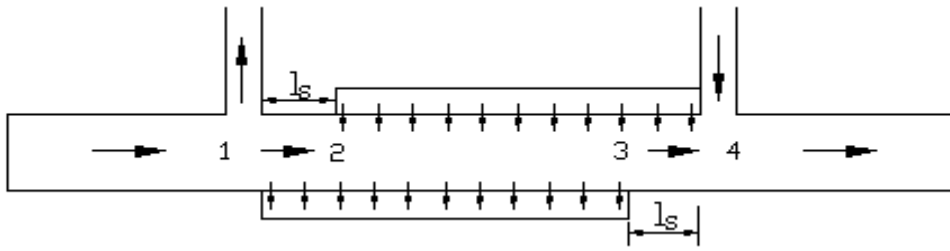


图 2 双洞单向交通混合式通风方式示意图

2.2 纵向—全横向混合通风的计算

2.2.1 纵向段

以图 1 单洞双向交通为例，纵向段的隧道风压

$$P_{s1} = P_{k1} + P_{t1} - (\xi_\lambda + \lambda L_1 / D) \rho / 2 \cdot (v_1^2 + v_n^2) \quad (1)$$

$$P_{s4} = P_{k4} + P_{t4} - (\xi_\lambda + \lambda L_4 / D) \rho / 2 \cdot (v_4^2 + v_n^2) \quad (2)$$

式中 P_{s1} 、 P_{s4} 分别为 1、4 点的压力； ξ_λ 为入口损失系数； λ 为隧道壁面阻力系数； L_1 、 L_4 为纵向通风段长度； D 为隧道等效直径； v_1 、 v_4 为两端纵向段隧道风速； v_n 为自然风速； ρ 为空气密度；

P_{k1} 、 P_{k4} 为射流风机升压力； P_{t1} 、 P_{t4} 为汽车交通风压。射流升压和交通风压的计算公式分别为

$$\Delta P_{k1} = \sum \rho \cdot v_j^2 \cdot \frac{A_j}{A} \cdot \left(1 - \frac{v_1}{v_j}\right) \cdot \eta \quad (3)$$

$$\Delta P_{k4} = \sum \rho \cdot v_j^2 \cdot \frac{A_j}{A} \cdot \left(1 - \frac{v_4}{v_j}\right) \cdot \eta \quad (4)$$

$$\Delta P_{t1} = \frac{A_m}{A} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n_1^+ (v_{t(+)} - v_1)^2 - \frac{A_m}{A} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n_1^- (v_{t(-)} + v_1)^2 \quad (5)$$

$$\Delta P_{t4} = \frac{A_m}{A} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n_4^+ (v_{t(+)} - v_4)^2 - \frac{A_m}{A} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n_4^- (v_{t(-)} + v_4)^2 \quad (6)$$

上述公式中 ρ 为空气密度； v_j 为射流风机出口风速； A_j 为射流风机出风口面积； A 为隧道横断面积； η 为射流风机效率； A_m 为汽车当量风阻面积； n_1^+ 、 n_4^+ 分别为在 1、4 段内和隧道风向相同的汽车车辆数； n_1^- 、 n_4^- 分别为和隧道风向相反的汽车车辆数； $v_{t(+)}$ 为与隧道内风向同向汽车风速； $v_{t(-)}$ 为与隧道内风向反向汽车风速。

2.2.2 半横向段

图 1 和图 2 的短道段均为半横向通风。图 1 的短道均为吸出式半横向，而图 2 的①②段为送入式半横向，③④段是吸出式半横向，通风计算较为复杂。

对于送入段的隧道单元其风压计算公式^[4]为

$$P_i = P_{i+1} \left(1 - \frac{A_i}{A} \cos \theta_i \right) + \frac{\rho Q^2}{2 A^2} \left((m-i)^2 - (m+1-i) \right) - \frac{\rho Q^2}{AA_i n^2} \cos \theta_i + P_{ki} - P_{ti} - P_{ri} \quad (7)$$

送风道风压

$$P_i' = \left(1 + \frac{A_i}{A_b} \cos \theta_i \right) P_{i+1}' + \frac{\rho Q^2}{2 A_b^2 n^2} \left(\left(\frac{\lambda l_i}{d} + \xi_i - 1 \right) (m+1-i)^2 + (m-i)^2 \right) + \frac{\rho Q^2}{2 A_i A_b n^2} \cos \theta_i \quad (8)$$

而对于吸出段的隧道单元，隧道风压计算式为

$$P_i = \left(1 + \frac{A_i}{A} \cos \theta_i \right) P_{i+1} - \frac{\rho Q^2}{2 A^2 n^2} \left(\left(1 - \frac{\lambda l_i}{d} - \xi_i \right) (m+1-i)^2 - (m-i)^2 \right) - \frac{\rho Q^2}{2 A_i A n^2} \cos \theta_i - P_{ki} - P_{ti} \quad (9)$$

排风道风压

$$P_i' = P_{i+1}' \left(1 - \frac{A_i}{A} \cos \theta_i \right) + \frac{\rho Q^2}{2 A_b^2 n^2} \left((n-i)^2 - \left(1 + \frac{\lambda l_i}{d} + \xi_i' \right) (n+1-i)^2 \right) - \frac{\rho Q^2}{A_b A_i n^2} \cos \theta_i \quad (10)$$

且

$$P_{ti} = \frac{\rho A_m l_i}{2 A l} \left(n_+ \left(v_{t(+)} - \frac{Q}{A} \left(\frac{m+1-i}{m} \right)^2 \right) - n_- \left(v_{t(-)} + \frac{Q}{A} \left(\frac{m+1-i}{m} \right)^2 \right) \right) \quad (11)$$

$$P_{ki} = \sum \rho v_j^2 \frac{A_j}{A} \eta \left(1 - \frac{Q}{A v_j} \left(\frac{n+1-i}{n} \right) \right) \quad (12)$$

上述式中 A_b 为风道断面积； θ_i 为送风口和风道之夹角； A_i 为送（排）风口有效面积； L_i 为半横向通风典型单元长度； P_{ki} 为射流风机升压力； P_{ti} 为汽车交通风压； P_{ri} 为隧道单元通风阻力； Q 为短道段的总送风量； m 为短道段的送风口数目。

2.2.3 全横向段

对于全横向通风段，取典型单元如图 3。则送风道的风压。图中 P_{si} 、 $P_{s(i+1)}$ 为送风道风压； v_{si} 、 $v_{s(i+1)}$ 为送风道风速； P_{pi} 、 $P_{p(i+1)}$ 为排风道风压； v_{pi} 、 $v_{p(i+1)}$ 为排风道风速； P_{sri} 为送风道单元通风阻力； P_{pri} 为

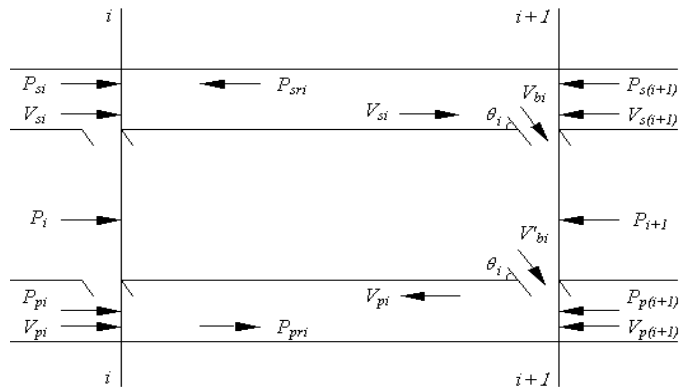


图 3 全横向通风典型单元

排风道单元通风阻力； l_i 为单元长度； n 为全横向段送、排风口数目。

假设送风道和排风道的面积相同，则有送风道风压

$$P_{si} = P_{s(i+1)} \left(1 + \frac{A_i}{A_b} \cos \theta_i \right) + \frac{\rho Q^2}{2A_s^2 n^2} \left(\left(\frac{\lambda_s l_i}{d} + \xi_{si} - 1 \right) (n+1-i)^2 + (n-i)^2 \right) + \frac{\rho}{2} \frac{Q^2}{A_i A_s n^2} \cos \theta_i \quad (13)$$

排风道风压

$$P_{pi} = P_{p(i+1)} \left(1 - \frac{A_i}{A} \cos \theta'_i \right) + \frac{\rho Q^2}{2A_p^2 n^2} \left((n-i)^2 - \left(1 + \frac{\lambda_p l_i}{d} + \xi_{pi} \right) (n+1-i)^2 \right) - \frac{\rho Q^2}{A_p A_i n^2} \cos \theta'_i \quad (14)$$

隧道风压为

$$P_i = P_{i+1} \left(1 + \frac{A_i}{A} \cos \theta'_i - \frac{A_i}{A} \cos \theta_i \right) + \frac{A_i}{A} \frac{\rho}{2} v_{bi}^{\prime 2} \cos \theta'_i - \frac{A_i}{A} \rho v_{bi}^2 \cos \theta_i \quad (15)$$

另外，根据压力平衡方程，对送、排风口分别有

$$P_{s(i+1)} - P_{i+1} = (1 + \xi_{bi}) \frac{\rho}{2} v_{bi}^2 \quad (16)$$

$$P_{i+1} - P_{p(i+1)} = (1 + \xi_{bi}') \frac{\rho}{2} v_{bi}'^2 \quad (17)$$

上述诸式中， λ 为隧道摩阻损失系数； λ_s 为送风道摩阻系数； λ_p 为排风道摩阻系数； ξ_i 为隧道局部损失系数； ξ_{si} 为送风道局部损失系数； ξ_{pi} 为排风道局部损失系数； ξ_{bi} 送风口损失系数； ξ_{bi}' 排风口损失系数； θ_i 为送风口和风道之夹角； θ'_i 为排风口和风道之夹角。

方程（13）、（14）、（15）中包含 P_i ， P_{i+1} ， P_{si} ， $P_{s(i+1)}$ ， P_{pi} ， $P_{p(i+1)}$ ， A_i ， A_i' ， θ_i 和 θ'_i 均未知，但是有边界条件：

$$P_{s(n+1)} = 150Pa \quad (18)$$

$$P_{n+1} = 100Pa \quad (19)$$

$$P_{p(n+1)} = 0Pa \quad (20)$$

式中： $P_{s(n+1)}$ 、 $P_{p(n+1)}$ 为送、排风道末端压力； P_{n+1} 为与送、排风道末端相对应的隧道处的压力。

利用上述各式，逐步迭代^[5]便可求出所有 P_i ， P_i' 。而隧道内风流的连续条件一般须依靠射流风机调压来满足。

3 纵向一半横向混合通风算例

设有一特长公路隧道，隧道长度 14.0km，交通量 1200 辆/小时，上、下行比例系数 1:1，隧道

需风量 $75\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ ，隧道横断面积 70.0m^2 ，隧道当量直径 8.65m 。两端纵向通风长度分别取 3.0km ，短道长度 100m ，风道断面面积 18.0m^2 ，风道当量直径 4.8m 。

利用所编制的公路隧道通风计算程序 VDSHT^[2]，分别计算了单洞双向交通和双洞单向交通时隧道的风压以及中间风道的风压。图 4 是计算得到的单洞双向交通纵向-全横向混合通风的隧道风压；图 5 是风道风压。图 6、图 7 是双洞单向交通时的隧道风压和风道风压。

分析图 4~图 7 的计算结果，可以看到无论是单洞双向交通还是双洞单向交通，计算得到的隧道风压和风道风压分布规律正确，说明这种通风方式完全可以用于特长公路隧道的通风。

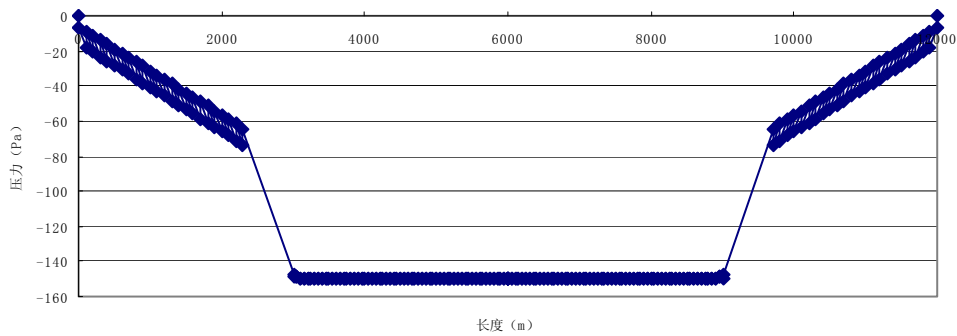


图 4 单洞双向交通纵向-全横向混合通风隧道风压

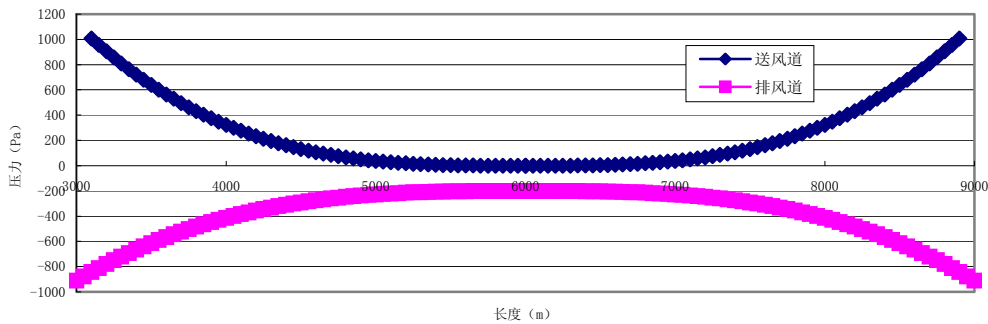


图 5 单洞双向交通纵向-全横向混合通风风道风压

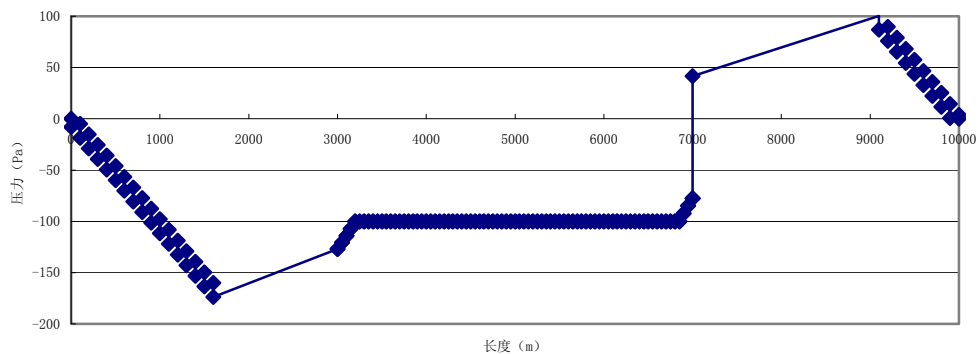


图 6 双洞单向交通纵向-全横向混合通风隧道风压

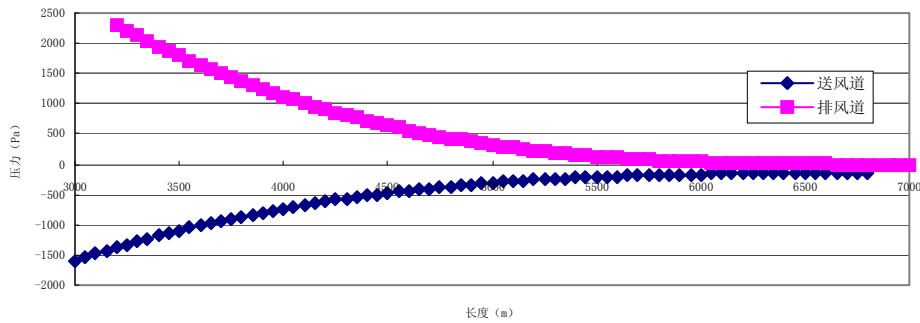


图 7 双洞单向交通纵向-全横向混合通风风道风压

4 结语

本文详细地研究了特长公路隧道的纵向-全横向混合通风方式。这种通风方式不仅可以解决不适应分段纵向通风的特长隧道，而且具有很好的综合经济比较优势。通过本文分析计算可以看到，纵向-全横向混合通风方式从技术上完全可行。它将和纵向-半横向混合通风方式一起为特长公路隧道的通风方案选择提供更为广阔的途径。虽然在两种通风方式的连接处，风流组织比较费事，压力的平衡需要射流风机来实现，但是依靠调整结构设计尺寸完全可以解决，对此将另文专门讨论。

参考文献

- [1] 夏永旭、王永东、赵峰. 秦岭终南山公路隧道通风方案讨论, 长安大学学报, Vol. 22(2002). 5, 48~50
- [2] 赵峰. 公路隧道通风研究及设计软件 VDSHT 的编制, 长安大学硕士学位论文, 2002. 6, 57~60
- [3] 夏永旭、杨忠、黄骤屹. 我国长大公路隧道建设的有关技术问题, 现代隧道技术, 2001. 6, 1~6
- [4] 夏永旭、戴国平. 现代公路隧道的发展, 2001 年全国公路隧道学术会议论文集, 人民交通出版社, 2001. 10, 140~143
- [5] 夏永旭. 板壳力学中的加权残值法, 西安: 西北工业大学出版社, 1994, 2~8

The Research on the Longitudinal-transverse Composite Ventilation System in Lengthy Highway Tunnels

Xia Yongxu, Zhao Feng

(Highway Institute, Chang' an University, Xi' an 710064, China)

Abstract: At present, the longitudinal ventilation system is regarded as the major one in highway

tunnels. However, there are fatal defects in the longitudinal ventilation system. For example, the length of each subsection is limited, the fire resistance and rescue functions cannot work well, the airshaft deeply buried is too long, and the execution is very difficult to be carried out, etc. Therefore, in respect to lengthy highway tunnels, the research on various combined ventilation systems expect the longitudinal one is really important in theory and practice. In this paper, a longitudinal-transverse composite ventilation system is recommended, and the equations being used to computing ventilation are deduced in detail. The boundary conditions are met by means of the collocation method. Through numerical computation examples, it is proved that the application of the longitudinal-transverse composite ventilation system is feasible in the lengthy highway tunnels.

Keywords: Lengthy Highway Tunnels, Longitudinal-transverse System, Composite, Ventilation

作者简介：夏永旭，男，1953年12月生，陕西武功人。长安大学公路学院教授，博士生导师，工学博士。赵峰，男，1976年9月生，河北保定人。长安大学桥梁与隧道专业博士研究生。