

文章编号:1007-6735(2014)01-0053-07

隧道通风活塞效应数值模拟方法研究

徐洪涛¹, 邵斌¹, 李贝贝¹, 胡观兴²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 栢诚(亚洲)有限公司, 香港)

摘要: 介绍了国内外隧道通风系统的最新研究进展. 研究了两种分析隧道通风活塞效应的数值模拟方法: 动网格法和动量源项法. 动网格法通过模拟车辆的真实运动, 可以给出隧道内详细的三维空间局部参数的变化趋势, 但该方法模拟耗时巨大, 效率较低. 动量源项法通过添加一个动量源来实现车辆移动, 该方法可避免消耗大量的计算资源和时间, 从而大大提高模拟效率.

关键词: 隧道通风系统; 活塞效应; 数值模拟

中图分类号: TK 124 **文献标志码:** A

Study of Numerical Simulation Methods for Tunnel Ventilation Piston Effect

XU Hong-tao¹, SHAO Bin¹, LI Bei-bei¹, HU Guan-xing²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Parsons Brinckerhoff (Asia) Ltd. Hong Kong, China)

Abstract: The review of tunnel ventilation systems was presented and the latest related researches in the country and abroad were introduced. Two numerical simulation methods were proposed to analyze the piston effect in the tunnel: dynamic mesh and momentum source method. The dynamic mesh method can reveal the real motion of vehicles and provide a detailed information of local parameter changes in 3-D space, however, much time should be taken for simulation and the efficiency is low. The momentum source method can achieve the vehicle motion by adding a momentum source. The latter method can avoid the large consumption of computing sources and time and can improve the simulation efficiency greatly.

Key words: tunnel ventilation system; piston effect; numerical simulation

隧道作为相对封闭的人造空间, 车辆在其中行驶将带来大量的污染物. 若隧道内的污染物不能及时排出, 将极大影响隧道内人员的健康. 如公路隧道内部空气污染物种类繁多, 主要包括颗粒物(尤其是

小粒子 PM₁₀, PM_{2.5})、气态一次污染物(CO, NO_x, SO₂, THC 等)以及气态二次污染物(O₃ 等). 这些污染物的存在严重威胁着隧道内驾乘人员和风井排放口周边居民的身体健康. 为了使隧道内的空气品质

收稿日期: 2013-09-28

基金项目: 上海市科委自然科学基金资助项目(12ZR1420900)

第一作者: 徐洪涛(1976-), 男, 讲师. 研究方向: 工程热物理. E-mail: htxu@usst.edu.cn

维持在可接受的水平,隧道内都要安装通风系统.隧道通风系统的作用主要有两个:当隧道内车辆阻塞产生大量污染物时,开启隧道通风系统进行稀释和排除;当隧道内发生火灾时,利用隧道通风系统进行烟气控制,维持隧道内可供人员逃生的可接受维生环境.

隧道内运行的车辆会引起隧道中的空气沿车流方向运动,因为类似汽缸内活塞压缩气体现象,故称为活塞效应(piston effect).通常情况下,活塞效应可以带入室外新鲜空气,从而稀释隧道内的污染空气.隧道内由车辆正常运行产生的气体污染物也可借助于活塞效应,通过自然通风的方式排出隧道外.充分利用活塞效应进行隧道通风,可以减小隧道风机不必要的启动次数,节约能源.在隧道通风系统的设计中,活塞效应需同隧道的通风系统设计一起进行分析.尤其是当隧道系统复杂时,隧道内气流模式将非常复杂,此时的隧道通风系统设计将变得更具挑战性.笔者首先对隧道通风系统的研究进行综述,其次,介绍了两种分析隧道内活塞效应的数值计算方法,并给出了相应的模拟分析结果.

1 隧道通风系统综述

国内外大量学者对隧道通风系统进行了研究,包括自然通风、机械通风及通风竖井的布置等.李成勋^[1]在公路隧道通风的目的和要求及其设计指导思想的基础上,研究了公路隧道顶部开孔自然通风的优点及其可行性.霍峙屹等^[2]研究了通风孔集中布置对隧道内空气流动及污染物扩散的影响.葛家美和毕海权^[3]研究了城市公路隧道采用顶部开孔的自然通风方式时,隧道内气流运动和污染物扩散问题.王军和张旭^[4]在通风系统的理论模型基础上,借助Lyapounov稳定性理论,建立系统热力学和动力学稳定性判据,指出宏观参数扰动与具体宏观过程的相互作用是决定公路隧道自然通风系统稳定性的根本原因.张祉道^[5]对车辆为双向行驶的低等级公路隧道,研究无需进行机械通风而仅采用自然通风的隧道最大长度.苏林军和张祉道^[6]针对车辆为单向行驶的高等级公路隧道,研究分析了无需进行机械通风而仅采用自然通风的隧道最大长度.童艳等^[7]采用量纲分析法,得到竖井型公路隧道自然通风的相似性准则.宋国森和胡斌^[8]对隧道不同的风机、横通道设置情况下的各工况进行了通风计算,寻找最有利的中性点位置,使隧道前后两段在各种工况的

需风量、风压差、风机总功率值尽量小,通过计算分析结果,得到了特长单洞双向隧道最优的通风设计参数.蒋效忠等^[9]对公路隧道射流风机与竖(斜)井排出式组合通风排烟方式建立系统设计理论计算模型,分析了不同工况下的通风排烟控制方案要求及影响因素.

Modic^[10]通过用准则数取代有害物质的浓度建立数学模型,通过相关的准则数来确定自然通风公路隧道内竖井的长度.Colella等^[11]通过多尺度建模方法,分析了在紧急通风和一些风机无法工作的情况下,隧道通风系统能够提供的通风流量.Wang等^[12]使用动网格模型,分析了不同半径的弯曲通道内,有汽车引起的交通力对通道内通风的影响.Ji等^[13]利用大涡模拟分析了城市公路隧道火灾,分析了竖井横截面积和竖井长宽比对隧道内自然通风的影响.Chow等^[14]建立了带坡度的等比例隧道模型,在机械通风的情况下,研究了不同坡度隧道内烟气的流动情况.Kang^[15]对隧道内的烟气控制中的临界风速做了研究,把隧道的高度作为特征长度,研究了阻塞比、隧道宽度、隧道长宽比对临界风速的影响.Ciocanea和Dragomiresue^[16]利用模块化通风减少隧道内分散污染物,着重研究了减少分散污染物时,通风口之间的距离、通风口和汽车之间的影响以及通风口的布置.Bari和Naser^[17]研究了由拥挤交通引起的隧道内污染物分布和浓度,着重分析了风机工作情况下和风机关闭情况下隧道内污染物分布情况.Ji等^[18]研究了在自然通风的隧道内,风向的不定期波动对隧道内通风的影响,实验利用示踪气体并引入了稀释流率DFR概念,实验表明DFR与风速、开口尺寸以及风向波动有关.Colella等^[19]在一定的环境条件下,提出了一种新的隧道内通风流动模拟方法——多尺度方法,这种方法能够提供局部流体的流动情况,此方法可为其他隧道的通风设计提供一定的参考.

随着计算流体力学CFD技术的发展,利用该技术辅助进行隧道通风系统设计越来越受到人们的重视.于福华等^[20]以公路隧道射流风机通风效果为研究对象,综合分析影响射流风机纵向通风效果的各项因素,利用CFD理论对射流风机的安装高度、风机轴线与隧道轴线之间的夹角进行优化仿真分析.王峰等^[21]采用CFD方法对曲线隧道内多种风机布置方式及射流特性进行三维数值模拟计算分析.方勇等^[22]运用大型通用CFD软件,对三车道公路隧道中射流风机的射流场进行模拟,并根据计算结果

确定公路隧道中射流风机的合理安装位置. 李含等^[23]运用 CFD 软件进行三维数值模拟,分析横通道及其附近区域的速度场,在合理定位横通道的前提下选定最佳风机类型和数量,保证通风负荷较小的下坡隧道内的新风量通过横通道送至上坡隧道内. Alexander 和 Walter^[24]运用 CFD 软件模拟了隧道内的通风,分析了不同通风方式对隧道内环境污染峰值的影响.

2 隧道通风活塞效应数值模拟方法

隧道内车辆运动引起的活塞效应取决于阻塞比(车辆横截面积和隧道横截面积之比)、隧道配置、隧道通风、系统设计和车辆速度等^[25-28]. 在传统隧道通风系统设计中,车辆引起的流动被视为一系列块的内流动. 结合车辆的阻力系数、交通设计速度以及当地平均纵向隧道空气流速,可以计算出阻力,进而用于确定射流风机大小等. 传统的设计方法对活塞效应并没有进行足够的分析,随着计算流体力学 CFD 模拟技术^[29]的发展,对隧道内活塞效应进行三维建模仿真分析成为可能,以下主要介绍两种活塞效应数值模拟方法.

2.1 动网格分析

由于隧道内车辆一直在运动,为了真实体现车辆运动引起的活塞效应,可以采用动网格技术进行分析. 动网格模型可以用来模拟流场形状由于边界运动而随时间改变的问题. 边界的运动形式可以是预先定义的运动,即可以在计算前指定其速度或角速度,也可以是预先未做定义的运动,即边界的运动要由前一步的计算结果决定. 网格的更新过程由采用的程序根据每个迭代步中边界的变化情况自动完成. 在使用动网格模型时,必须首先定义初始网格、边界运动的方式并指定参与运动的区域. 可以用边界型函数或者自定义边界的运动方式,将运动的描述定义在网格面或网格区域上. 如果流场中包含运动与不运动两种区域,则需要将它们组合在初始网格中以对它们进行识别. 那些由于周围区域运动而发生变形的区域必须被组合到各自的初始网格区域中.

图 1 为进行三维动网格建模的隧道横纵剖面示意图. 隧道、通风竖井和列车的数据为:隧道截面积 75.9 m^2 ,长度 $1\,633 \text{ m}$;通风竖井截面积 12 m^2 ,长度 12 m ;列车截面积 10 m^2 ,长度 236 m ^[30].

利用 FLUENT 软件^[29]进行动网格建模,采用标准 $k-e$ 湍流模型进行分析. 模型设置其它具体

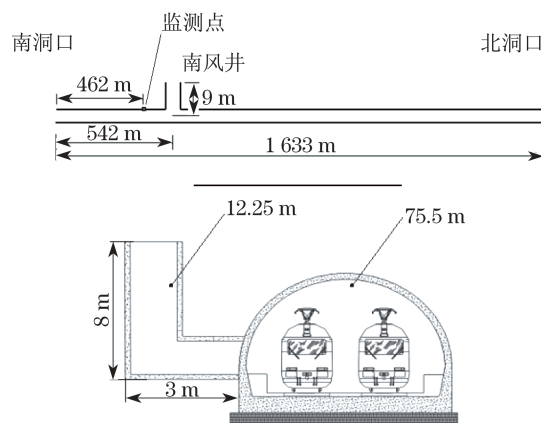


图 1 隧道及通风竖井布置剖面示意图

Fig.1 Sectional view of tunnel and vent-shaft arrangement

参数可以参见文献[30]. 图 2 为网格划分区域示意图,其中包含列车的区域为移动区域,车站区域为固定区域. 图 3 为隧道入口处三维网格划分模型. 利用上述动网格技术,分析了隧道内压力波的变化,并与实测数据进行了对比,具体结果见下页图 4. 从图 4 可以看出,利用动网格技术进行隧道内移动列车分析时,虽然模拟结果与实测数据局部有差异,但模拟结果能清楚显示压力波峰谷值出现的位置,总体变化趋势仍比较一致. 图 5(见下页)显示了通风竖井局部压力波随时间变化的分布情况.

从以上分析可知,动网格技术可以给出隧道内详细的三维空间局部参数的变化趋势,但同时,利用

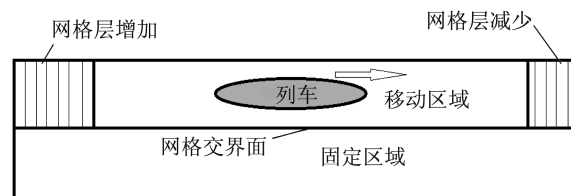


图 2 模拟列车运动采用的移动网格和动边界示意图

Fig.2 Dynamic mesh and boundary condition used to simulate train movement

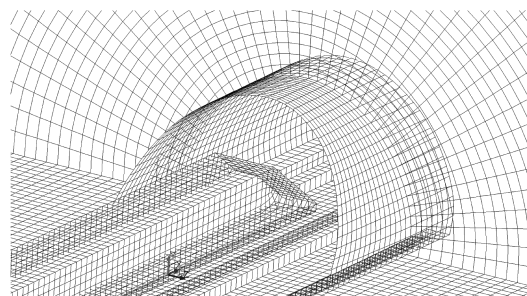


图 3 隧道入口处三维网格划分

Fig.3 3D meshing at the entrance of the tunnel

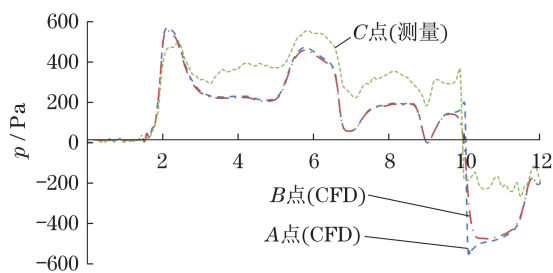
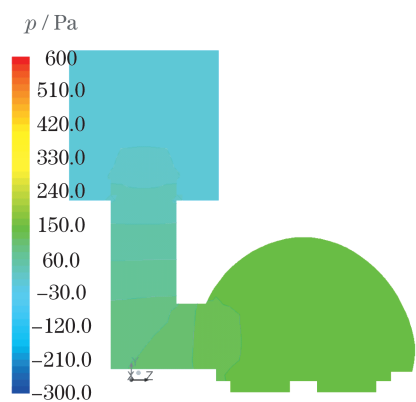
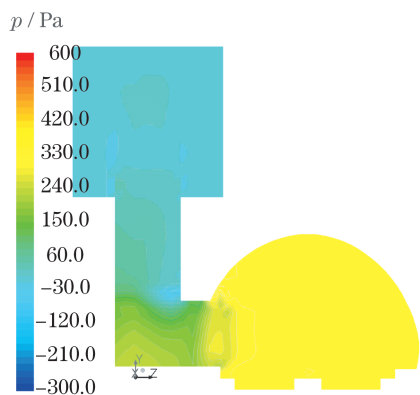


图4 列车运行速度 177.5 km/h 时模拟结果与测试数据对比
Fig.4 Comparison between pressure measurement results and CFD results at the train speed of 177.5 km/h



(a)



(b)

图5 通风竖井内压力波随时间变化轮廓图

Fig.5 Pressure wave variation with time in vent-shaft
动网格技术进行数值模拟耗时巨大,尤其是在网格数较多的情况下,需要采用并行计算或在专用服务器上,效率较低.

2.2 动量源项法

重点研究另外一种高效分析隧道内活塞效应的 CFD 模拟方法,即动量源法^[31].图6为一个 500 m 长的隧道模型.隧道的横截面积为 57.27 m²,隧道的水力直径 $D_H = 7.71$ m.在隧道的中间位置放置了一个 3.2 m × 1.2 m × 520 m 的矩形区域用来模拟

车辆的线性结构(见图7).

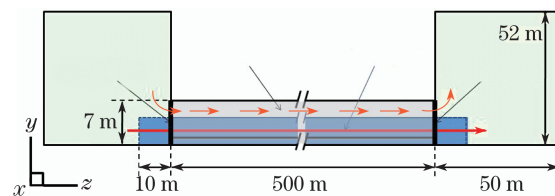


图6 公路隧道 CFD 模型的示意图

Fig.6 Schematic diagram of the road tunnel CFD model

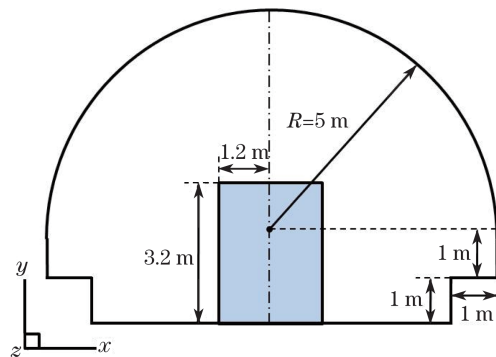


图7 简化后的公路隧道横截面

Fig.7 Simplified geometry of a road tunnel cross section

由于车辆在隧道内运行,模拟计算区域应包括隧道入口和出口区域.车辆在隧道内运行都要经受空气阻力 F .如果车辆在一个横截面积为 A_T 的隧道内运行,活塞效应会导致与汽车同一方向流动的空气压力(F/A_T)的增强^[32].如果车辆速度为 U 且空气速度为 U_0 .那么在同一方向上它们的相对速度为 $(U - U_0)$,车辆运动方向上的阻力 F 可以通过方程(1)计算出来.

$$F = 0.5 C_D C_V A_T \rho (U - U_0)^2 \quad (1)$$

式中, ρ 为空气的密度; C_D , C_V 为车辆阻力系数和该系数的校正因子,具体如表1所示.

表1 车辆阻力系数的校正因子

Tab.1 Correction factor of vehicle drag coefficient

车距	远	30 m	15 m	近
C_V	0.8	0.6	0.5	0.4

根据上述理论,笔者研究出一种新的三维 CFD 数值方法,在该模型中,公路隧道中间位置将通过添加一个动量源来实现车辆移动.该方法可考虑隧道内的车辆活塞效应,用来模拟一个完整的公路隧道系统.纵向通风隧道内的流动为稳定不可压缩流.速度和压力耦合可利用 CFD 软件 Fluent 来解决,控制方程用有限体积法离散化,其余具体参数设置见文献^[32].与动网格技术相比,该方法可避免消耗大量的计算资源和时间,大大提高模拟效率.图8为该隧

道模型详细的计算网格划分示意图。

图9显示了计算区域内不同横截面处 z 方向上的速度 V 的分布轮廓图。车辆的平均行驶速度设定为80 km/h。在距离道路隧道入口20 m处,模拟结果显示空气速度较低(图9(a)所示)。隧道中间位置空气速度较高,这是高速行驶的车辆通过隧道中心造成的(图9(b)和9(c)所示)。图10(见下页)显示车辆在以80 km/h速度行驶时, $y-z$ 平面内的速度分布情况。从图中可知,由于列车运动,气流从隧道入口带入隧道中,而隧道中间段纵向速度分布比较均匀。随着列车驶出隧道,隧道出口处的气流朝 $z+$ 方向流动,形成出口射流。

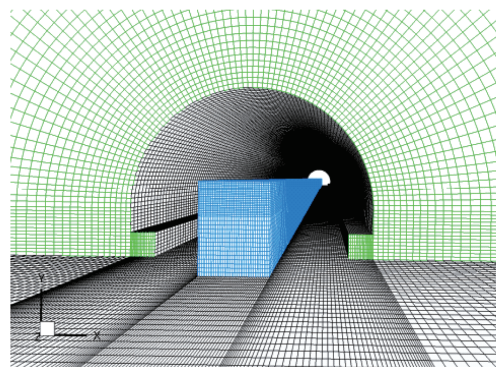


图8 计算网格分布

Fig.8 Computational grid distributions

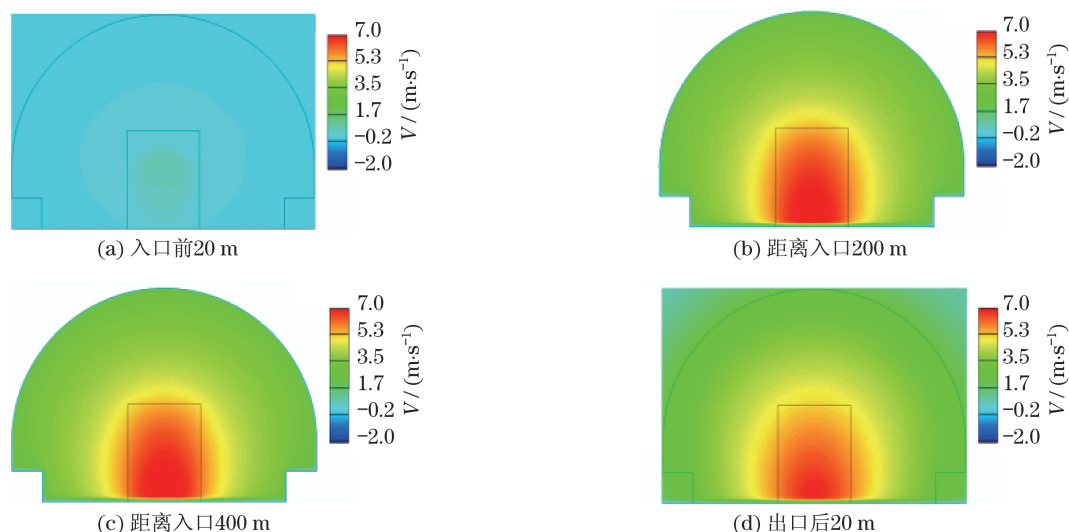


图9 80 km/h行驶时 $x-z$ 平面内的速度分布云图

Fig.9 Velocity contours in $x-z$ planes at 80 km/h

从以上分析可知,采用上述动量源法进行数值模拟,可以准确的反映出活塞效应在隧道不同位置处的变化情况,同时,该方法可以大大缩短模拟分析的时间。上述模拟方法如需考虑供气和排气口以及射流风机的作用,则可以通过 FLUENT 程序中的 UDF 进行修改设定。

4 结 论

综述了目前国内外隧道通风系统的研究进展,大部分学者集中于通风方式、竖井布置、污染物扩散等的研究上,而对隧道内活塞效应很少关注。随着人们对空气质量的关注度和节约能源的意

识越来越高,如何有效的利用活塞效应进行隧道通风是目前关注的研究热点之一。

基于计算流体力学 CFD 技术,本文重点介绍了两种分析隧道活塞效应的方法:动网格和动量源法,并给出了利用该方法进行分析的部分模拟结果。动网格法可以在模型中真实体现车辆在隧道内的移动情况,但需要消耗大量的时间和计算资源,效率较低。动量源法可以避免上述因采用动网格法而带来的问题,大大缩短模拟时间。模拟结果可以清楚显示隧道内活塞效应在不同位置处的变化情况,该方法也可以进一步考虑其他一些影响活塞效应的因素,如更复杂的隧道结构、隧道的通风系统设计及室外环境条件等。

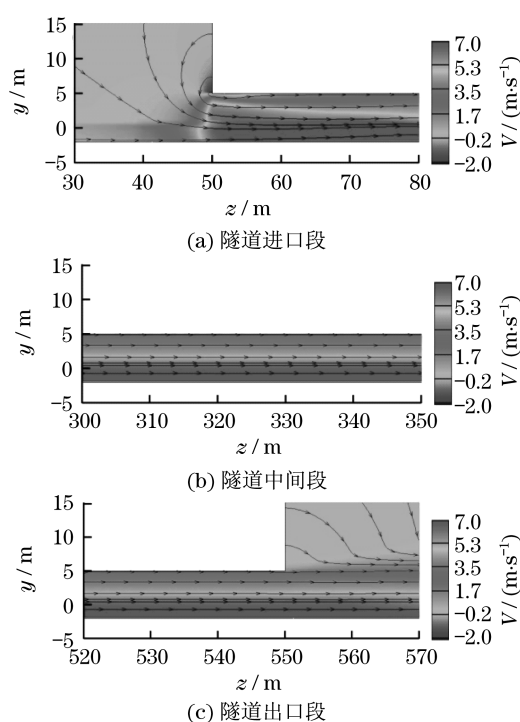


图 10 80 km/h 行驶时 $y-z$ 平面内的速度分布云图
Fig.10 Velocity contours in $y-z$ planes at 80 km/h

参考文献:

- [1] 李成勋. 城市隧道顶部开孔自然通风的优点[J]. 中国高新技术企业, 2008, (1): 146.
- [2] 霍峙屹, 胥海伦, 王子云. 顶部开孔集中布置对城市公路隧道自然通风的影响[J]. 制冷与空调, 2012, 26(5): 440 - 443.
- [3] 葛家美, 毕海权. 顶部开孔组合方式对城市公路隧道自然通风的影响[J]. 制冷与空调, 2011, 25(1): 91 - 95.
- [4] 王军, 张旭. 公路隧道自然通风热动力学稳定性分析[J]. 陕西理工学院学报, 2008, 24(3): 31 - 36.
- [5] 张祉道. 公路隧道自然通风适用长度的初步研究(上)[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(1): 41 - 45.
- [6] 苏林军, 张祉道. 公路隧道自然通风适用长度的初步研究(下)[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(2): 61 - 65.
- [7] 童艳, 施明恒, 茅靳丰, 等. 竖井型公路隧道自然通风过程的实验研究[J]. 暖通空调, 2009, 39(9): 61 - 65.
- [8] 宋国森, 胡斌. 特长公路隧道平导通风方案研究及优化[J]. 公路交通科技, 2011, 28(4): 84 - 95.
- [9] 蒋效忠, 倪天晓, 彭锦志, 等. 公路隧道射流风机与竖(斜)井排出式组合通风排烟设计及控制方案研究[J]. 消防技术与产品信息, 2012(10): 43 - 46.
- [10] Modic J. Air velocity and concentration of noxious substances in a naturally ventilated tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(4): 405 - 410.
- [11] Colella F, Rein G, Carvel R, et al. Analysis of the ventilation systems in the Dartford tunnels using a multi-scale modelling approach [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(4): 423 - 432.
- [12] Wang F, Wang M N, He S, et al. Computational study of effects of traffic force on the ventilation in highway curved tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(3): 481 - 489.
- [13] Ji J, Han J Y, Fan C G, et al. Influence of cross-sectional area and aspect ratio of shaft on natural ventilation in urban road tunnel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 67: 420 - 431.
- [14] Chow W K, Wong K Y, Chung W Y. Longitudinal ventilation for smoke control in a tilted tunnel by scale modeling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(2): 122 - 128.
- [15] Kang K. Characteristic length scale of critical ventilation velocity in tunnel smoke control [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(2): 205 - 211.
- [16] Ciocanea A, Dragomirescu A. Modular ventilation with twin air curtains for reducing dispersed pollution[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 37: 180 - 198.
- [17] Bari S, Naser J. Simulation of airflow and pollution levels caused by severe traffic jam in a road tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(1): 70 - 77.
- [18] Ji L, Tan H W, Kato S, et al. Wind tunnel investigation on influence of fluctuating wind direction on cross natural ventilation [J]. Building and Environment, 2011, 46(12): 2490 - 2499.
- [19] Colella F, Rein G, Borchiellini R, et al. Calculation and design of tunnel ventilation systems using a two-scale modeling approach [J]. Building and Environment, 2009, 44(12): 2357 - 2367.
- [20] 于福华, 贺昱曜, 李国强. 公路隧道射流风机通风效果优化研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(11): 214 - 216.
- [21] 王峰, 王明年, 邓园也. 曲线公路隧道射流风机布置方式优化研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(5): 86 - 90.
- [22] 方勇, 兰宇, 曾艳华, 等. 三车道公路隧道射流风机设置位置研究[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(2): 90 - 98.
- [23] 李含, 孙三祥, 张京龙. 双洞单向公路隧道横通道定位及风机选型[J]. 建筑热能通风空调, 2012, 31(2): 99 - 102.

- [24] Brown A B, Dabberdt W F. Modeling ventilation and dispersion for covered roadways[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(5):593 – 608.
- [25] Chen T Y, Lee Y T, Hsu C C. Investigations of piston-effect and jet fan-effect in model vehicle tunnels[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 73(2):99 – 110.
- [26] Ke M T, Cheng T C, Wang W P. Numerical simulation for optimizing the design of subway environmental control system[J]. Building and Environment, 2002, 37(11):1139 – 1152.
- [27] Maele K V, Merci B. Application of RANS and LES field simulations to predict the critical ventilation velocity in longitudinally ventilated horizontal tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2008, 43(8):598 – 609.
- [28] Betta V, Cascetta F, Musto M, et al. Fluid dynamic performances of traditional and alternative jet fans in tunnel longitudinal ventilation systems[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(4):415 – 422.
- [29] 王福军. 计算流体力学分析 – CFD 软件原理与应用[D]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [30] Wu K H, Xu H T. Comparison of 3D CFD simulation approach for aerodynamics effects in high speed railway tunnel system [C] // 15th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation & Fire in Tunnels. Barcelona, 2013:433 – 441.
- [31] Wu K H, Lin Y F, Pin Y F. et al. Efficient numerical simulation of ventilation system design of road tunnels [C] // Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Houston, 2012.
- [32] Daly B B. Woods Practical Guide to Fan Engineering [M]. Colchestre: Woods of Colchester Ltd, 1992.
- (编辑:金 虹)

.....

(上接第 52 页)

- [17] Maqbool O, Babri H. Hierarchical clustering for software architecture recovery[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2007, 33(11):759 – 780.
- [18] Cilibrasi R, Vitanyi P. A fast quartet tree heuristic for hierarchical clustering[J]. Pattern Recognition, 2011, 44(3):662 – 677.
- [19] Jain A K, Dubes R C. Algorithms for clustering data [M]. Englewood Cliff: Prentice-Hall, 1988.
- [20] Saporta G, Youness G. Comparing two partitions: some proposals and experiments [C] // Compstat Berlin: Physical-Verlag HD, 2002:243 – 248.
- [21] 康勤. 基于 MPEG-7 边缘直方图描述符的图像检索算法[J]. 西南大学学报, 2008, 30(5):149 – 153.
- [22] Deselaers T, Ney H, Keysers D. Features for image retrieval [D]. Aachen: RWTH Aachen University, 2003:77 – 79.
- (编辑:金 虹)