

# 新型隧道纵向通风的理论探究

胡纯良 余跃进 张海琳 毛炳文 郝小充

(南京师范大学 能源与机械工程学院 江苏 南京 210042)

**[摘要]** 叙述了国内外隧道通风的发展现状以及各种隧道通风方式的优缺点,进而提出了一种将风机安置在隧道两侧的新型纵向隧道通风方式.分别从隧道内风机射流特性、工程经济性以及噪音控制方面对新型的纵向隧道通风方式进行综合分析,与传统的隧道纵向通风方式相比具有一定的优越性.

**[关键词]** 隧道,新型,纵向通风,风机

**[中图分类号]** TU834 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-4292(2012)01-0038-05

## Theoretical Research on New Tunnel Longitudinal Ventilation System

Hu Chunliang, Yu Yuejin, Zhang Hailin, Mao Bingwen, Hao Xiaochong

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** The paper firstly narrates the development of tunnel ventilation at home and abroad and the relative merits and demerits of all tunnel ventilation systems, then puts forward a new tunnel longitudinal ventilation system which places the fans on both sides of the tunnel. From the comprehensive analysis of the fan jet characteristics, engineering economy and the noise control, the conclusion is arrived at that the new tunnel longitudinal ventilation system is better than traditional ones.

**Key words:** tunnel, new type, longitudinal ventilation, fan

如今特长公路隧道陆续出现,解决了“天然屏障”的通路问题,促进了公路网更加合理与通畅<sup>[1]</sup>.国内公路隧道的建设迅猛发展,近3年每年增长约60~70万m.2008年底我国公路隧道通车里程318.64万m(5426座),已建成或正在建设中的6km以上隧道约30座<sup>[2]</sup>.随着公路隧道建设规模的日益扩大,隧道通风方面的设计及管理越来越突显其重要性,因而长、大隧道对通风系统有着更高的要求.隧道通风系统不仅要满足隧道内日常通车运营卫生需求,还要满足隧道火灾情况下排烟系统的有效运作,以确保隧道的安全运营<sup>[3]</sup>.现在长、大隧道常用通风方式有:全横向、半横向以及纵向通风等方式.这几种隧道通风方式从技术上比较各有利弊.本文提出将风机安置在隧道两侧的新型纵向通风方式,是对传统纵向隧道通风的一种改进,能更好地迎合公路隧道发展的需要,是对隧道通风方式的一种补充,有必要进行探索和研究.

## 1 隧道通风方式国内外研究现状

20世纪80年代以前,欧洲大多数国家的长、大公路隧道采用了横向式或半横向式通风方案,其中以瑞士、奥地利、意大利为代表.例如:建于1970年5月~1980年9月的全球运营中第二长公路隧道圣哥达(Saint Gotthard)公路隧道,全长16900m,采用半横向通风方式;建成于1987年的奥地利普拉布奇(Plabutsch)隧道,全长9634m,采用全横向通风方式.近30年来,国际上纵向通风方案逐渐形成主流.日本长、大公路隧道几乎全部采用了纵向通风方案,欧洲也逐渐开始借鉴采用.如建成于1990年的日本关越(Kanetsu)隧道,全长11010m,采用竖井纵向式通风;建于1995年3月~2000年11月的世界最长公路隧道艾于兰(Aurland)——洛达尔(Laerdal)隧道,长达24500m,纵向通风;建成于2001年的挪威福尔格冰川(Folgefonn)隧道,全长11130m,纵向通风方式.

收稿日期:2011-10-14.

通讯联系人:余跃进,教授,研究方向:建筑节能. E-mail: dlkj@njnu.edu.cn

— 38 —

近年来,公路隧道技术日趋完善,国内所采用的隧道通风方案也经历了由最初的全横向、半横向通风方式向分段纵向式通风方案过渡的过程。代表性隧道有:双向分离式四车道秦岭终南山特长公路隧道(长达18.41 km,长度居亚洲第一,世界第二)、中梁山隧道、木鱼槽隧道、二郎山隧道、大溪岭隧道、大别山隧道、象山隧道等。

## 2 隧道通风方式

公路隧道通风就是利用机械或自然通风方式向隧道内压入新鲜空气、向隧道外排出浑浊空气,稀释洞内由车辆排出的废气和烟雾,确保隧道内良好的空气品质<sup>[4]</sup>。

通风方式按动力可划分为自然通风和机械通风。机械通风按通风风流的流动方向基本上可以分为横向式通风、半横向式通风和纵向式通风3大类。纵向通风的土建费用最低,后期的运营费用也比较低,方式灵活多变,但洞内的卫生状况和防排烟效果不如横向和半横向两种通风方式<sup>[5]</sup>。

其他通风方式这里不再赘述,下面详细介绍机械通风的纵向通风方式。纵向式通风是将新鲜空气从隧道一端引入,有害气体与烟尘则从隧道的另一端排出。在通风过程中,隧道内的有害气体与烟尘沿纵向流经全隧道。根据采用的通风设备,又可分为洞口风道式通风与射流风机通风。

如图1(a)所示,传统的隧道纵向通风射流风机是安置在隧道的拱顶部位,隧道风机若是出现问题,由于需要维修的风机多且都在隧道顶上,必须停止隧道运营并要在隧道内设置台架才能及时对风机进行维修,这给隧道运营以及风机维修带来很大的不便。若如图1(b)所示,风机安置在隧道两侧的新型纵向通风方式能很好地解决这个问题。首先,风机维修人员可以在不停止隧道运营的情况下安全进入隧道,对损坏的风机进行维修;其次,因为风机在隧道两侧,维修人员完全不需要台架就可以工作。在确保隧道内部环境卫生和防排烟效果都符合设计要求的情况下,新型隧道纵向通风方式很好地解决了传统纵向通风维修困难的问题。

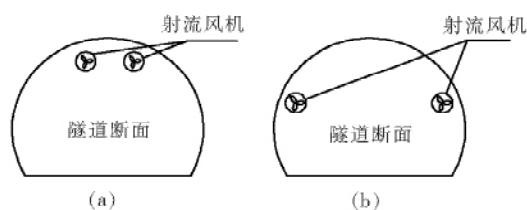


图1 新型纵向通风示意图

Fig.1 Diagram of new longitudinal ventilation

## 3 新型纵向隧道通风方案评估

### 3.1 射流风机布置方式

射流通风是在隧道中将多组风机按一定间距串接,利用射流的诱导效应和增压效应,在隧道中形成空气的纵向流动,满足隧道通风、换气的需要。

根据紊动射流结构的基本特性可知,射流风机组的横向断面位置应保证射流具有完整的初始段流动,初始段流动结构如图2所示。 $O$ 为射流极点; $a$ 为扩散角; $X_0$ 为出口极点距离; $X_s$ 为初始段长度; $R_0$ 为射流的起始半径; $R_s$ 为初始段末端扩散半径,则有: $R_s = (X_0 + X_s) \tan a$ 。

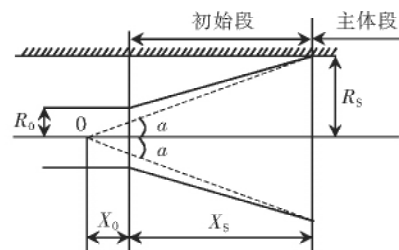


图2 风机射流结构

Fig.2 Fan jet structure

传统的纵向隧道通风,一组风机通常由两个风机并列悬挂在隧道拱顶。由于受到拱壁和并列风机的干扰,射流初始段长度有所缩短,进而影响风机的性能,隧道内空气质量达不到设计的要求。所以风机组进行横向断面布置时,风机中心与拱壁的径向距离不小于 $R_s$ ,要求风机的中心距离不小于 $2R_s$ <sup>[6]</sup>。但由于施工时隧道内的情况较为复杂,计算 $R_s$ 存在误差、风机安装误差以及隧道内气流组织比较混乱等原因,射流往往达不到预期效果。新型的纵向通风方式,风机组横向断面布置时,风机分别安置在隧道两侧,各射流均有完整的初始段,不会受到隧道拱壁和相邻风机的影响,很好地解决了上述问题。因为各风机射流都有完整的初始段,风机的性能得到最佳利用,在满足设计隧道空气品质前提下,可减少隧道风机布置数量,减轻工作量,节省一定的设备费用。

### 3.2 经济性分析

经济性对比分析应该从初期土建、设备投资以及后期运营管理费用等方面进行综合比较。国内外城市

隧道的工程实践表明,通风的土建与设备费用约占整个隧道工程费用的 1/3 以上<sup>[7]</sup>. 因此,在对比隧道通风方案时,不仅要考虑到尽可能减少近期通风主体工程的费用和通风设备的投资,而且要十分重视降低后期运营成本和维护费用.

3.2.1 土建投资对比

传统的纵向通风方式是把风机安置在隧道顶端,为了保证隧道有足够安全通车高度,施工时必须加高隧道横断面的纵向高度,以预留安置风机的空间. 这在一定程度上增加了隧道施工的工作难度,而且在隧道顶端安置风机必须有高大台架,在增加投资同时也增加了风机安装人员的危险性. 本文提出的风机安装在隧道两侧的新型纵向通风方式相对于传统的纵向通风,隧道宽度有所增加,但高度要明显低于传统的纵向通风方式的隧道,相应抵消了隧道加宽带来的隧道横断面面积的增加,甚至可以减小原有工程的隧道横断面面积,减小工程土方量,从而降低工程土建费用. 至于工程土方量的变化,要根据具体工程实例的设计需要来判断.

如图 3(b) 所示,新型纵向通风方式与传统的通风方式相比,  $S_1$  是减少的隧道横断面面积,  $S_2$  和  $S_3$  是为设置风机增加的隧道横断面面积.

若  $S_1 > S_2 + S_3$ , 则隧道总横断面积减小,工程土方量也随之减小;

若  $S_1 < S_2 + S_3$ , 则隧道总横断面积增加,工程土方量也没有增加.

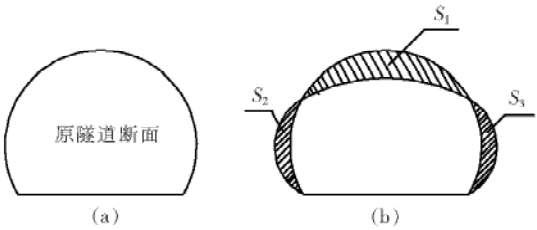


图 3 隧道断面面积比较  
Fig.3 Comparison of tunnel section

例如,成渝高速公路某隧道断面当量直径  $d_e = 7.32\text{ m}$ ,隧道断面面积  $F = 51.7\text{ m}^2$ ,隧道左洞长(不含遮光棚) 3 167 m,汽车为单向上坡行驶,采用竖井分段纵向式通风;右洞长(不含遮光棚) 3 104 m,汽车为单向下坡行驶,采用全射流纵向通风<sup>[8]</sup>. 该隧道若采用新型纵向通风方式,则隧道平均横截面积可降为  $50.6\text{ m}^2$ ,节省土方量约:  $V = L \times (F) = 3\,104 \times (51.7 - 50.6) = 3\,414.4\text{ m}^3$ ,从而节省风道等土建费用大约 130 万元.

3.2.2 后期维护费用对比

隧道通车后,隧道风机经常会发生故障,影响风机的性能,特别是因为运行时间长而老化的风机,从而影响隧道内部的空气质量,所以要定期对隧道风机进行维护. 传统的纵向隧道通风方式必须关闭隧道,工作人员才能进入隧道对风机等设备进行定期的维护,操作起来非常不方便. 对城市的正常交通影响非常大,尤其对于一些盈利性质的隧道,关闭隧道进行维修会造成巨大的经济损失.

中梁山隧道是当时国内第一座特长公路隧道<sup>[9]</sup>,近年来,车载货物超高、风机超负荷长时间运行等频繁出现致使射流风机损坏. 汤小明、邹景用研究发现目前重庆成渝高速公路有限公司维修的电机占射流风机总数的 35% 左右,每年要支付高达 10 万元风机检查维修等费用.

中梁山隧道设计高峰交通量为中型车 1 001 veh/h,目前,该隧道实际高峰交通量已经超过 2 000 veh/h,且高峰持续时间较长. 射流风机全负荷承担隧道通风任务,每天运行近 12 h,对于改善隧道通风效果起着重要作用<sup>[10]</sup>. 以每辆日平均通行费 16 元计算,开发商每年的通行费收入可达到:  $20\,000 \times 16 \times 365 = 657\,000\,000\text{ 元} = 1.168\text{ 亿元}$ . 平均一年有 5 d 时间关闭隧道对隧道进行维护,就有 160 万的经济损失. 详细经济比较如表 1 所示.

表 1 经济比较  
Table 1 Economic comparison

通风方式	隧道净横截面积 / $\text{m}^2$	隧道主要工程费用 / 万元	后期维护造成年损失 / 万元
传统纵向通风	51.7	8 909	170
新型纵向通风	50.6	8 780	10

综上所述,不管是隧道前期建设方面,还是从后期运营以及维护方面来比较,新型纵向通风方式相比传统纵向通风方式经济上具有明显的优越性.

3.3 噪音分析及控制

由于新型的纵向隧道通风方式风机是安置在隧道两侧,机械运行以及电机运转产生的噪声对工作人

员以及行车人员危害更大。许鸣良<sup>[11]</sup>研究表明暴露在道路附近高强度噪音下的人们更容易患高血压。隧道噪音给行车的驾驶员、隧道工作人员以及居住在附近的居民生活带来很大的影响。根据《城市区域噪声标准(GB 3096-93)》中4.5条例规定:城市中的道路交通干线道路两侧区域允许噪声级昼间不超过70 dB,夜间不超过55 dB<sup>[12]</sup>。

国外研究发现,多孔隙沥青路面可以有效地降低路面噪声,低噪音沥青路面已经在日本,欧美国家得到了广泛的应用,而我国尚处于研究阶段<sup>[13-16]</sup>。马保国<sup>[17]</sup>等研究发现:低噪音沥青路面有很强的吸声系数,并且孔隙率为23%,最大公称粒径为10 mm,厚度为40 mm的沥青混合料吸声系数最大,达到43.2%。提高混合料孔隙率,降低最大公称粒径,采用40 mm厚度的沥青混合料路面,可以有效降低沥青路面噪音,提高行车舒适度以及减少噪音对公路周围居民的危害。徐颖<sup>[18]</sup>等提出在薄微穿孔板微孔中穿入铜纤维的结构和梁李斯<sup>[19]</sup>等提出闭孔泡沫铝材的吸声共振型防噪屏障的方法,都可以适当运用到隧道中,可以很好地控制噪音。若隧道离居民区较近,则还需要设置人工防噪屏壁。马保国指出如果将防噪屏壁面设为曲面,即鼓面对噪声的反射效果会更好。经过一系列的降噪措施之后,受噪声污染的区域大约有80%的部分噪声级降低到50 dB以下,达到了国家相关标准要求。

## 4 结论

(1) 传统纵向隧道通风方式,由于施工时隧道内的情况较为复杂、计算 $R_s$ 存在误差、风机安装误差以及隧道内气流组织比较混乱等原因,射流往往达不到预期效果。新型的纵向通风方式将会大大改善此类问题,各风机射流均有完整的初始段,风机性能得到最佳利用,可减少隧道风机安置数量,节省一定设备费用。

(2) 不管是隧道前期建设方面,还是从后期运营以及维护方面来比较,新型纵向通风方式相比传统纵向通风方式经济上具有明显的优越性。

(3) 孔隙率为23%,最大公称粒径为10 mm,厚度为40 mm的沥青路面吸声系数可达43.2%,采用40 mm厚度的沥青混合料路面,可以有效降低沥青路面噪音,提高行车舒适度并减少对公路周围居民的噪音危害。

本文只是简单地从理论分析新型纵向式隧道通风方式的优越性,还有很多问题亟待研究,若用CFD软件对隧道内部进行模拟将会有更好的效果。

## [参考文献](References)

- [1] 李刚,张文胜,孔亮. 特长公路隧道通风新模式[J]. 公路, 2008(3): 201-207.  
Li Gang, Zhang Wensheng, Kong Liang. New ventilation mode extra-long tunnel[J]. Highway, 2008(3): 201-207. (in Chinese)
- [2] 李伟平. 公路隧道设计与施工的现状和问题探讨[J]. 公路, 2011(8): 293-298.  
Li Weiping. Current situation and countermeasures for design and construction of highway tunnel[J]. Highway, 2011(8): 293-298. (in Chinese)
- [3] 蔡珊瑜. 特长隧道通风系统选型的探讨[J]. 地下空间, 2004, 24(1): 75-80.  
Cai Sanyu. Investigation on selection of ventilation system for extra-long tunnel[J]. Underground Space, 2004, 24(1): 75-80. (in Chinese)
- [4] 中国公路学会《交通工程手册》编委会. 交通工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.  
The Editorial Committee of Traffic Engineering Manuals. Traffic Engineering Manuals[M]. Beijing: China Communications Press, 1998. (in Chinese)
- [5] 茅新丰,黄玉良,章毅,等. 城市公路隧道通风方案的评估研究[J]. 流体机械, 2008, 36(10): 35-41.  
Mao Jinfeng, Huang Yuliang, Zhang Yi, et al. Economic study of city highway tunnel with natural ventilation[J]. Fluid Machinery, 2008, 36(10): 35-41. (in Chinese)
- [6] 郑道访. 公路长隧道通风方式研究[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2000.  
Zheng Daofang. The Research of Ventilation of Long Road Tunnel[M]. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing Press, 2000. (in Chinese)

- [7] 刘柏林,程久胜. 夹活岩特长公路隧道通风方案研究[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(1): 41-47.  
Liu Bailin, Cheng Jiusheng. Ventilation scheme for Jiahuoyan extra long highway tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2005, 42(1): 41-47. (in Chinese)
- [8] 莫文卿. 成渝高速公路中梁山隧道和晋云山隧道的设计[J]. 世界隧道, 1999(5): 13-18.  
Mo Wenqin. Design of Zhongliangshan tunnel and Jinyunshan tunnel on Chengdu-Chongqing expressway[J]. The World Tunnel, 1999(5): 13-18. (in Chinese)
- [9] 王晓雯,陈建忠,邹景用,等. 中梁山公路隧道运营环境的调查与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 62(3): 438-443.  
Wang Xiaowen, Chen Jianzhong, Zhou Jingyong, et al. Investigation and analysis of the operation environment of Zhongliangshan road tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 62(3): 438-443. (in Chinese)
- [10] 汤小明,邹景用. 中梁山隧道国外进口射流风机损坏修复[J]. 公路交通技术, 2011(1): 118-122.  
Tang Xiaoming, Zou Jingyong. Repair for damages of imported jet fan in Zhongliangshan mountain tunnel[J]. Technology of Highway and Transport, 2011(1): 118-122. (in Chinese)
- [11] 许鸣良. 道路噪音导致血压升高[J]. 基础医学与临床, 2009, 29(11): 179.  
Xu Mingliang. Road noise leading to high blood pressure[J]. Basic and Clinical Medicine, 2009, 29(11): 179. (in Chinese)
- [12] 国家环境保护局. GB. 3096-1993, 城市区域噪声标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.  
Environmental Protection Agency. GB. 3096-93, Standard of environmental noise of urban area[S]. Beijing: Chinese Standards Press, 1993. (in Chinese)
- [13] 李殿双,侯英超. 多孔隙沥青路面降低交通噪声研究[J]. 交通世界, 2005(4): 72-74.  
Li Dianshuang, Hou Yingchao. Reduce the traffic noise of porous bituminous pavement[J]. Traffic World, 2005(4): 72-74. (in Chinese)
- [14] 王美艳. 公路隧道噪声预测及降噪措施研究[D]. 西安: 西北工业大学建筑工程学院, 2007.  
Wang Meiyan. Prediction of highway tunnel noise and research of traffic noise reduction[D]. Xian: Northwestern Polytechnical University School of Mechanics and Civil and Architecture, 2007. (in Chinese)
- [15] 曹卫东,陈旭,吕伟民. 简述国内外低噪音沥青路面研究状况[J]. 石油沥青, 2005, 19(1): 50-54.  
Cao Weidong, Chen Xu, Lv Weimin. The recapitulation of low-noise asphalt pavement at home and abroad[J]. Petroleum Asphalt, 2005, 19(1): 50-54. (in Chinese)
- [16] 徐皓,倪富健,刘清泉,等. 排水性沥青混合料降噪性能测试研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(5): 10-13.  
Xu Hao, Ni Fujian, Liu Qingquan, et al. Research of absorption coefficient of porous asphalt[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(5): 10-13. (in Chinese)
- [17] 马保国,魏定邦,李相国,等. 隧道低噪音沥青路面降噪性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(7): 69-71.  
Ma Baoguo, Wei Dingbang, Li Xiangguo, et al. Research on low-noise asphalt pavement of tunnel[J]. Wuhan University of Technology, 2010, 32(7): 69-71. (in Chinese)
- [18] 徐颖,任玉凤,李晨曦. 穿入铜纤维薄微穿孔板的吸声性能[J]. 噪声与振动控制, 2011(3): 136-140.  
Xu Ying, Ren Yufeng, Li Chenxi. Study on absorption performance of thin micro-perforated panel penetrated with copper fiber[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011(3): 136-140. (in Chinese)
- [19] 梁李斯,姚广春,穆永亮,等. 闭孔泡沫铝声屏障设计[J]. 噪声与振动控制, 2007(2): 71-74.  
Liang Lisi, Yao Guangchun, Mu Yongliang, et al. Design of closed-cell aluminum foam sound barriers[J]. Noise and Vibration Control, 2007(2): 71-74. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]