

文章编号:1671-8879(2012)04-0051-04

特长公路隧道运营网络通风技术

王磊¹, 郭洋洋²

(1. 长安大学 工程设计研究院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:为了给特长公路隧道运营通风提供设计依据,以流体力学为基础,藉以图论理论与方法将隧道通风系统转化为通风网络,利用节点法通风计算软件解算隧道通风网络,根据公路隧道通风照明设计规范及依托工程交通量等具体情况,对隧道左右线各不同交通工况进行通风计算,以按需分风为原则确定合适的通风设备开启数量。在通风解算过程中,将交通风压拟合为隧道内通风量的三次多项式,以轴流风机形式加入通风网络,改变以往采用常量交通风压的计算方法。计算结果表明:隧道近远期通风设计方案均能够满足隧道通风要求,节点法网络通风技术的可行性及适用性较强;左线近期通风中交通风压随着交通车速的降低迅速减小,其在总风压中所占到的比例在5.94%~28.37%之间。

关键词:隧道工程;公路隧道;运营期;节点法;网络通风

中图分类号:U453.5 **文献标志码:**A

Network ventilation technology of operation period in super long highway tunnel

WANG Lei¹, GUO Yang-yang²

(1. Institute of Engineering Design and Research, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to give design basis for the super long highway tunnel, based on fluid dynamics, the tunnel ventilation system was converted to the ventilation network with the graph theory and method. The ventilation network was solved with the ventilation calculation software. According to the design standards of highway tunnel ventilation and lighting, the required air of different conditions in the about line of Mixiliang tunnel was calculated to determine a reasonable number of ventilation equipment and installation location. In the ventilation solver, the traffic pressure was fitted as cubic polynomial with the ventilation volume, and joined into the network as an axial flow fan. The results show that the tunnel ventilation design can meet the tunnel ventilation requirements, at the same time, the feasibility and applicability of the advantages of node method for network ventilation is demonstrated. The left lane of traffic in the recent ventilation air pressure decreases rapidly with the reduction of traffic speed, the proportion of the traffic pressure in the total pressure is between 5.94% to 28.37%. 9 tabs, 1 fig, 7 refs.

Key words: tunnel engineering; highway tunnel; operation period; node method; network ventilation

0 引言

随着中国高速公路建设的飞速发展,出现了大量长大公路隧道。隧道运营通风系统是一个随着交通量、车速等变化的动态体系,在特长隧道的复杂通风系统中,对隧道中风流方向的判断、通风参数界定等问题制约着隧道通风技术的发展。随着计算机技术的发展,国内外学者编制了很多隧道通风解算程序。国外学者为关越隧道(Kan-etsu)一线通风系统编制了一套程序,通过模拟计算验证了隧道通风系统的实用性和可靠性,并为半横向通风和纵向通风中非稳态与稳态气流编制了模拟程序;中国相关人员编制了隧道通风网络仿真计算软件,并对多座特长隧道进行了一元流通风模拟。通风网络具有两方面优势:一是便于计算机程序化的实现,将大量的迭代计算交给计算机来完成,解算速度快,结果精确;二是可以应用于复杂多变的通风系统,从而使网络仿真程序的适应性大大加强,所以在隧道通风中引入通风网络理论^[1]。本文采用 Visual C++ 语言编写的计算软件,以流体力学为基础,利用通风网络中的节点法,将通风系统化为“节点”、“支路”等网络元素,通过“串联”、“并联”、“角联”等连接关系,自由组合通风方式,计算程序适用性强^[2-3]。

1 隧道通风基本理论

1.1 射流风机纵向通风计算理论

射流风机升压原理是利用射流风机出口所产生的高速气流推动前方空气流动,同时在风机后方形形成一个负压区,带动后方空气流入,从而使隧道内风机前后一定范围内的空气流体沿隧道轴向定向流动,将污染物排出洞外^[4]。在射流通风中,隧道内存在自然风压 ΔP_m 、交通风压 ΔP_t 、通风阻力 ΔP_r 和射流风机升压 ΔP_j ,其关系式为

$$\Delta P_m + \Delta P_t - \Delta P_r + n\Delta P_j = 0 \quad (1)$$

式中: n 为风机台数

1.2 竖井送排式纵向通风计算理论

竖井送排式纵向通风是在隧道内设置竖井,并将竖井分为排风道和送风道,利用排风风机和送风风机对隧道进行通风^[5]。隧道中存在的通风力有送风机送风口升压 ΔP_b 、排风口升压 ΔP_e 、自然风压 ΔP_m 、交通风压 ΔP_t 、通风阻力 ΔP_r 和射流风机升压 ΔP_j ,它们之间满足以下关系式

$$\sum \Delta P_b + \sum \Delta P_e + \Delta P_m + \Delta P_t - \Delta P_r + \sum n\Delta P_j = 0 \quad (2)$$

2 通风网络理论及程序

通风网络理论是以图论为基础,将实际工程中的通风系统以一定的方式和原则网络化,所得网络叫做通风网络图^[6]。在通风网络图中具体事物用点来表示,各事物之间的联系用它们之间的连线来表示,这些点和连线的集合就组成了一个图,通常把这样的点叫做节点,把连线叫做分支。具体到隧道通风网络图中,各不同风路相交的地方以点表示,各条风路则成为分支。

2.1 通风网络内风流变化的基本规律

(1)风量平衡定律。假定空气密度不变,无漏风,忽略空气中水蒸气的变化,则风网内任意节点(或回路)相关分支的风量代数和为 0。

(2)风压平衡定律。风网的任何闭合回路内,各分支风压代数和为 0;分支风压包含通风阻力和通风动力 2 部分。

(3)阻力定律。隧道风路中正常风流一般均为紊流,各分支的风压和风量均符合紊流阻力定律。

2.2 计算程序

本文使用的隧道网络通风计算程序是长安大学邵泮凡在 Windows 平台上采用 Visual C++ 语言编写完成的^[7]。该程序以流体力学基本定律作为数学模型,以网络通风中的节点法为计算理论,采用线性迭代法实现计算过程。

程序的使用步骤:①打开程序主界面,对要计算的工程命名;②输入并保存节点数和支路数;③输入通风支路,程序自动生成关联矩阵;④输入各支路风阻系数;⑤输入节点风量,是指有风量从该节点进入或离开通风网络;⑥输入风机参数,程序会进行拟合,得出所用风机的风量风压特性曲线;⑦导入各参数矩阵,进行计算;⑧结果数据输出。

3 工程概况

安康—陕川界高速公路是国家确定的西部大通道阿荣旗—北海高速公路在陕西境内的一段,同时也是陕西省规划的“三纵四横五辐射”公路主骨架中的一段。该高速公路穿越秦巴山地区,沿线地形复杂,其中米溪梁特长隧道单洞长近 8 000 m,对其通风系统的优化就尤为重要。

米溪梁隧道设置为左右线分离的平行双洞,设计行车速度为 80 km/h,隧道净断面积 63.66 m²,当量直径为 8.31 m。隧道按 250 m 左右间距设置人行横洞,按 750 m 左右间距设置了车行横洞,在

车行横洞对应位置设置紧急停车带,紧急停车带宽度较主洞加宽 2.75 m(含路缘带为 3.5 m),全长 40 m(含两端各 5 m 渐变段)。隧道左线纵坡为+1.5%(4 276 m)/-0.5%(3 660 m),右线纵坡为+0.5%(3 645 m)/-1.5%(4 275 m)。隧道设计交通量见表 1。

表 1 年平均日交通量(小客车)
Tab.1 Average daily traffic volume

年份	2015 年	2020 年	2029 年
交通量/(veh·d ⁻¹)	8 905	13 970	26 155

米溪梁隧道近期左右线采取全射流纵向通风;远期左右线采取斜井送排纵向通风。隧道近远期风机使用见表 2。

表 2 隧道通风风机配置
Tab.2 Configuration of ventilation fan

项目		1120 型射流风机		轴流送风机		轴流排风机	
		台数/台	功率/kW	台数/台	功率/kW	台数/台	功率/kW
近期	左线	28	28				
	右线	30	28				
远期	左线	28	28	2	300	2	150
	右线	30	28	2	300	1	150

4 米溪梁隧道运营通风计算

本文对米溪梁左线隧道 2015 年、2029 年设计年限,工况车速分别为 80、60、40、20、10 km/h 进行通风效果计算。这里仅以 80 km/h 和 40 km/h 工况为算例,在近期交通中为了研究交通通风力的作用,计算只有交通风压作用下的隧道通风。

将米溪梁隧道左线正常运营通风结构图转化为图 1。图 1 中支路①、③为隧道主线,支路②为短道,④为排风道,⑤为送风道,⑥、⑦、⑧为虚拟支路。其中①设有 1120 型射流风机 10 台,支路③设有 1120 型射流风机 18 台,支路④设有轴流排风机,支路⑤设有轴流送风机。当计算近期交通时,因为采用射流风机纵向通风,支路④、⑤应该关闭;当计算远期交通时,打开④、⑤支路。

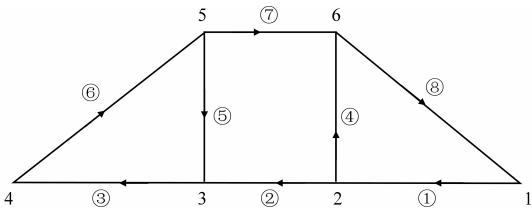


图 1 隧道左线通风网络
Fig.1 Ventilation network of left tunnel

图 1 中节点 1 为隧道主洞进口,节点 2 为竖井排风道进口,节点 3 为竖井送风道出口,节点 4 为隧道主洞出口,节点 5 为竖井送风道进口,节点 6 为竖井排风道出口。

4.1 左线近期正常运营通风计算

(1)近期米溪梁左线正常交通($V=80\text{ km/h}$, V 为车速)工况计算结果见表 3。

表 3 80 km/h 近期正常交通工况计算结果
Tab.3 Calculation results of 80 km/h normal traffic at recent

支路	风阻/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-7}$)	风量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	风压/Pa
①	0.002 010	337.805 756	229.366 585
②	0.000 054	337.798 502	6.207 466
③	0.004 117	337.791 690	469.762 982
④	1 000 000	0.007 254	52.620 265
⑤	1 000 000	-0.006 812	-46.401 389
⑥	0	337.791 690	0.011 410
⑦	0	337.798 502	0.011 411
⑧	0	337.805 756	0.011 411

通过以上计算结果可知,隧道风速 $v=Q/A=5.31\text{ m/s}$, Q 为风量, A 为隧道截面积;满足隧道需风量及通风规范要求。

(2)近期米溪梁左线正常交通($V=40\text{ km/h}$)工况计算结果见表 4。

表 4 40 km/h 近期正常交通工况计算结果
Tab.4 Calculation results of 40 km/h normal traffic at recent

支路	风阻/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-7}$)	风量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	风压/Pa
①	0.002 010	294.721 355	174.589 961
②	0.000 054	294.715 597	4.725 036
③	0.004 117	294.710 267	357.578 500
④	1 000 000	0.005 758	33.150 397
⑤	1 000 000	-0.005 331	-28.416 675
⑥	0	294.710 267	0.008 685
⑦	0	294.715 597	0.008 686
⑧	0	294.721 355	0.008 686

通过计算结果可知,隧道内风速 $v=4.63\text{ m/s}$,满足隧道需风量及通风规范要求。

4.2 左线近期交通风压通风计算

(1)近期米溪梁左线 80 km/h 工况交通风压通风效果计算结果见下页表 5。

(2)近期米溪梁左线 40 km/h 工况交通风压通风效果计算结果见下页表 6。

4.3 交通风压与总风压的关系

隧道左线近期运营通风中,交通风压与总风压的关系见下页表 7。

表 5 80 km/h 工况交通风压通风计算结果

Tab. 5 Calculation results of 80 km/h traffic pressure

支路	风阻/(kg·m ⁻⁷)	风量/(m ³ ·s ⁻¹)	风压/Pa
①	0.002 010	179.818 811	64.992 957
②	0.000 054	179.807 199	1.745 854
③	0.004 117	179.795 662	133.088 119
④	1 000 000	0.011 612	134.840 438
⑤	1 000 000	-0.011 537	-133.091 351
⑥	0	179.795 662	0.003 233
⑦	0	179.807 199	0.003 233
⑧	0	179.818 811	0.003 233

表 6 40 km/h 工况交通风压通风计算结果

Tab. 6 Calculation results of 40 km/h traffic pressure

支路	风阻/(kg·m ⁻⁷)	风量/(m ³ ·s ⁻¹)	风压/Pa
①	0.002 010	112.856 631	25.600 604
②	0.000 054	112.849 434	0.687 689
③	0.004 117	112.842 102	52.423 161
④	1 000 000	0.007 288	53.113 396
⑤	1 000 000	-0.007 240	-52.424 434
⑥	0	112.842 102	0.001 273
⑦	0	112.849 343	0.001 273
⑧	0	112.856 631	0.001 274

表 7 交通风压与总风压的关系

Tab. 7 Relation of traffic pressure and total pressure

工况车速/(km·h ⁻¹)	80	60	40	20
通风总压/Pa	705	618	536	471
交通风压/Pa	200	137	79	28
比例/%	28.37	22.17	14.74	5.94

由表 7 可见,在米溪梁左线近期 4 种工况车速下,设计运营通风方案均能够满足隧道通风要求。在达到设计车速时,通风方案提供的风量大于隧道需风量,这可以适当减少风机的开启量或减少开启时间,降低能耗;近期左线通风中交通风压随着工况车速的降低迅速减小,其在总风压中所占到的比例在 5.94%~28.37%之间。可见,在米溪梁左线隧道通风中交通风压的作用较小,但还是尽量要保证隧道内行车速度,积极利用交通风压的作用。

4.4 左线远期正常运营通风方案

(1)远期米溪梁左线正常交通(V=80 km/h)工况计算结果见表 8。

通过以上计算结果可知,隧道主线①风速 $v=7.18$ m/s,短道②风速 $v=3.89$ m/s,隧道主线③风速 $v=8.28$ m/s,符合隧道通风规范要求。

(2)远期米溪梁左线正常交通(V=40 km/h)工况计算结果见表 9。

表 8 80 km/h 远期正常交通工况计算结果

Tab. 8 Calculation results of 80 km/h normal traffic at forward

支路	风阻/(kg·m ⁻⁷)	风量/(m ³ ·s ⁻¹)	风压/Pa
①	0.002 010	457.263 695	420.271 074
②	0.000 054	248.237 893	3.352 240
③	0.004 117	527.113 500	1143.902 857
④	0.024 937	209.025 801	1089.542 058
⑤	0.011 750	278.875 606	913.816 344
⑥	0	527.113 500	0.027 785
⑦	0	248.237 893	0.006 162
⑧	0	457.263 695	0.002 091

表 9 40 km/h 远期正常交通工况计算结果

Tab. 9 Calculation results of 40 km/h normal traffic at forward

支路	风阻/(kg·m ⁻⁷)	风量/(m ³ ·s ⁻¹)	风压/Pa
①	0.002 010	365.043 375	267.845 898
②	0.000 054	157.606 591	1.351 287
③	0.004 117	438.685 693	792.296 631
④	0.024 937	207.436 784	1073.039 594
⑤	0.011 750	281.079 103	928.314 177
⑥	0	438.685 693	0.019 245
⑦	0	157.606 591	0.002 484
⑧	0	365.043 375	0.001 333

由表 9 可知,隧道主线①风速 $v=5.73$ m/s,短道②风速 $v=2.47$ m/s,隧道主线③风速 $v=6.88$ m/s,满足隧道通风要求。

5 结 语

(1)基于隧道通风理论,应用 Visual VC++ 语言编制的隧道网络通风可视化程序,可以根据需要模拟各种形式、各种组合下隧道通风,克服了传统计算方法的局限性。

(2)对米溪梁隧道正常运营工况下通风设计进行计算,结果表明,近、远期通风设计方案均能够满足隧道通风要求。

(3)近期左线通风中交通风压随着工况车速的降低迅速减小,在总风压中占到的比例在 5.94%~28.37%之间;米溪梁左线隧道通风中交通风压的作用较小,但还是尽量要保证隧道内行车速度,积极利用交通风压的作用。

参考文献:

References:

[1] 苑郁林. 通风网络理论在公路隧道运营通风设计中的应用[J]. 公路,2003(10):22-24.
YUAN Yu-lin. Application of ventilation network in the highway tunnel ventilation design [J]. Highway, 2003(10):22-24. (in Chinese)

出。设计引入数据回卷的存储机制,使存储空间变成一个“永远存不满的空间”,确实保证了数据存储不溢出;保存了最新最近的数据。通过以上的详细设计,设计出了一个在特殊情况下也可以正常使用的数据记录系统模式。该记录系统已经在个各种教练车上得到了应用,用于记录学员操作仪器的每一个动作。

参考文献:

References:

- [1] 汤显,孟小峰. FClock:一种面向 SSD 的自适应缓冲管理算法[J]. 计算机学报, 2010, 33(8): 1460-1471.
TANG Xian, MENG Xiao-feng. FClock: an adaptive buffer replacement algorithm for SSD[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(8): 1460-1471. (in Chinese)
- [2] 周大,梁智超,孟小峰. HF-Tree:一种闪存数据库的高更新性能索引结构[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(5): 832-840.
ZHOU Da, LIANG Zhi-chao, MENG Xiao-feng. HF-Tree: an update-efficient index for flash memory[J]. Journal of Computer Research and Deveopment, 2010, 47(5): 832-840. (in Chinese)
- [3] 朱宁太,姚智慧,张淑萍. 基于可信存储的固态硬盘安全机制研究[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(6): 1212-1215.
ZHU Ning-tai, YAO Zhi-hui, ZHANG Shu-ping. Authentication scheme research on solid-state disk based on trusted storage[J]. Computer Engineering and Design, 2010, 31(6): 1212-1215. (in Chinese)
- [4] 高文青,沈维聪. NAND 存储器在嵌入式系统中的应用[J]. 电测与仪表, 2008, 45(2): 45-48, 57.

(上接第 54 页)

- [2] 景思督,张鸣远. 流体力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.
JING Si-du, ZHANG Ming-yuan. Fluid mechanics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. (in Chinese)
- [3] 王惠宾. 矿井通风网络理论与算法[M]. 北京:中国矿业大学出版社,1996.
WANG Hui-bin. Mine ventilation network theory and algorithms[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1996. (in Chinese)
- [4] 王永东,夏永旭. 公路隧道纵向通风数值模拟[J]. 中国公路学报, 2002, 15(1): 82-85.
WANG Yong-dong, XIA Yong-xu. The road tunnel longitudinal ventilation numerical simulation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(1): 82-

GAO Wen-qing, SHEN Wei-cong. NAND flash application in embedded system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 45(2): 45-48, 57. (in Chinese)

- [5] 罗晓,刘昊. 一种基于 FAT 文件系统的 NAND Flash 坏块处理方法[J]. 电子器件, 2008, 31(2): 716-719.
LUO Xiao, LIU Hao. Method of NAND flash memory bad block management based on FAT file system[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2008, 31(2): 716-719. (in Chinese)
- [6] 王宏强,王太勇,邓辉,等. 面向闪存类存储设备嵌入式文件系统研究与实现[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(3): 814-819.
WANG Hong-qiang, WANG Tai-yong, DENG Hui, et al. Research on embedded file system faced flash memory[J]. Application Research of Computers, 2008, 25(3): 814-819. (in Chinese)
- [7] 杨春林,雷航. 基于 NAND Flash 的嵌入式文件系统的改进与优化[J]. 计算机应用, 2007, 27(12): 3102-3104.
YANG Chun-lin, LEI Hang. Improvement and optimization of embedded file system based on NAND Flash[J]. Computer Applications, 2007, 27(12): 3102-3104. (in Chinese)
- [8] Robert T. Trusted computing for disk drives and other peripherals[J]. IEEE Security and Privacy, 2006(9): 26-33.
- [9] 顾宝根,顾喜梅. 日志结构的嵌入式文件系统研究[J]. 计算机工程与设计, 2004, 25(6): 915-917.
GU Bao-gen, GU Xi-mei. Research for mechanism of journal file system used in embedded environment[J]. Computer Engineering and Design, 2004, 25(6): 915-917. (in Chinese)
- [5] 仇玉良. 公路隧道复杂通风网络分析技术研究[D]. 西安:长安大学, 2005.
QIU Yu-liang. The complicated ventilation network technology research of highway tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [6] 王立新. 长大公路隧道网络通风研究[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(4): 76-82.
WANG Li-xin. Study on long highway tunnel network ventilation system[J]. Modern Tunneling Technology, 2008, 45(4): 76-82. (in Chinese)
- [7] 邵泽凡. 节点法网络通风计算程序研究[D]. 西安:长安大学, 2010.
SHAO Pan-fan. Study on the calculation program of network ventilation in node method[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)