

公路隧道通风弯道设计优化研究*

李峰^{1,2}, 夏永旭¹, 苟长飞^{1,3}

(1. 长安大学, 西安 710064; 2. 新疆交通规划勘察设计研究院, 乌鲁木齐 830006,
3. 温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司, 浙江 温州 325000)

摘要: 在长大公路隧道通风系统中, 经常涉及到设置导流叶片的弯曲风道。本文首先对隧道通风系统弯道局部效应进行了探讨, 继而采用有限元数值模拟方法系统研究了角度分别为30°、60°、90°的弯曲风道及含同心圆型、翼形、107°薄圆形、95°薄圆形导流叶片直角弯曲风道的局部阻力损失系数, 并将其计算结果与经验公式进行对比验证。在此基础上对公路隧道通风弯道设计参数进行了进一步优化研究。研究表明: (1) 直弯风道内局部阻力损失系数与所设置的导流叶片类型及直弯参数(r/D)密切相关, 不同类型导流叶片的设置只有对应特定的直弯参数(r/D)才能达到较好的导流效果; (2) 采用角度为80°的弯曲风道取代设置导流叶片的直弯风道完全可行。

关键词: 通风; 弯曲风道; 数值模拟; 局部阻力损失系数; 导流叶片

中图分类号: U458.1 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2014)02-0455-05

Study on the Design Optimization of Bending-Duct in Road Tunnel

Li Feng^{1,2}, Xia Yongxu¹, Gou Changfei^{1,3}

(1. Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Xinjiang Transportation Planning Survey and Design Institute, Urumqi 710064 China; 3. Wenzhou Railway and Mass Transit Investment Group Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325000, China)

Abstract: In the ventilation system of long highway tunnel, there is often concern of the use of bending-ducts with diversion vanes. At first, this paper explores the problem of the local loss effect in ventilation system in the tunnel, then, by means of numerical simulation, studies the local loss coefficients of bending-ducts with an angle of 30°, 60° and 90° and the ducts with the diversion vane of the types as concentric circle, wing, 107° thin circular, 95° thin circular, at the same time, empirical formula are used to test and verify the reliability of the model parameters, finally, the bending-duct parameter in road tunnel design is optimized based on the acquired conclusion. It is concluded that: (1) The local loss coefficient of bending-duct is closely related to the types of diversion vane and the parameter r/D , the diversion effect would be better as various diversion vanes meet the specified r/D ; (2) The feasibility of replacing diversion vane by adjusting different bending-duct angle is verified.

Keywords: ventilation; bending-duct; numerical simulation; local loss coefficient; diversion vane

1 引言

现行《公路隧道通风照明设计规范》^[1]编写时我国长大公路隧道建设刚刚起步, 由于《规范》中

对长大公路隧道通风系统弯道局部效应论述不足, 弯道设计参数取值往往只能借鉴流体力学经验公式或引用国内外其它领域的研究成果^[2,3]。近年来, 隧道科研设计人员开始关注这一问题^[4,5], 如

* 收稿日期: 2013-10-12(修改稿)

作者简介: 李峰(1983-) 男, 陕西西安人, 博士, 工程师, 主要从事隧道与地下工程等领域的设计与科研工作。

E-mail: 599184225@qq.com

基金项目: 交通部西部建设科技项目(2013 318 802 400)

长安大学夏永旭、石平等对雁门关特长公路隧道通风系统进行了局部优化^[6,7];湖南交科院李跃军等利用 CFD 技术对雪峰山特长公路隧道特殊通风段进行了系统研究并提出了优化方案^[8]。

本文拟采用 CFD 技术,通过对比分析具有不同几何参数的通风弯道所对应的局部阻力损失系数,研究以一定角度弯道代替设置导流叶片直弯风道的可行性,以期达到同样减少通风能耗损失并降低施工和后期维护难度的效果。

2 直弯风道局部效应及其对策

如图 1 所示,在直弯风道中,气流流向将发生改变,流速及压力分布沿程不断调整。在弯道前部,凸壁附近气流收缩,凹壁附近气流扩散,产生凹壁涡流区 A;在弯道出口,凸壁附近气流扩散,凹壁附近气流收缩,产生凸壁涡流区 B。气流在弯道中流动,所受离心力与流速平方成正比,故流核(高流速区)处的离心力大于近壁处的离心力。此力矩使气流在弯道横断面上生成了二次环流(涡对)。该环流叠加于轴向主流之上,使弯道中的气流呈螺旋线型流态,此螺旋形态还延续于弯道后一定长度的直风道上。弯曲风道局部阻力便是由于上述结构中的这 3 种现象造成的,即:(1)凸壁处形成的涡流;(2)凹壁处形成的涡流;(3)风道横断面中的二次环流。

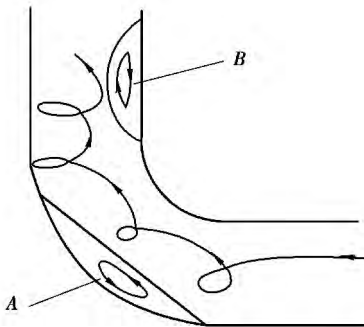


图 1 弯曲风道流场

Fig. 1 The flow field of bending-duct

由于边界层脱离形成的涡流区流动与轴向流动在交界面处有较强的动量交换,消耗了主流的能量,形成了弯道的局部阻力损失。(1)、(2)中以(1)起主要作用,它基本上决定了弯道的阻力大小及弯管后一定直风道段上流速场的形变。(3)的二次流动则对弯道轴向流速再分布起着重要作用,该再分布过程消耗一次流动的能量,增长了弯道局部阻力损失。这些由弯道中流动形成的能量消耗,

影响空间远不限于弯道本身,而是扩展到弯道的上下游。因此,弯道局部损失必须计及上下游影响段^[9,10]。

在公路隧道通风系统直弯风道通风设计中,为了快速引导气流流过弯道,尽可能减少由于弯道存在所消耗的能量,一般采用在弯道中加设导流叶片的方法来解决这个问题^[1]。弯道加设导流叶片后,风道内外侧流体对管壁冲击以及内侧流体的惯性作用均减弱,弯道内侧边界层脱离程度降低,外侧冲击范围减小。弯道部分的压力分布趋于合理,截面上速度分布变得均匀。虽然这样降低了风压损失,但由于导流叶片结构安装要求高,这对施工和后期维护都增加了困难。

公路隧道通风系统能耗受弯道局部效应影响较大,但对此问题,《公路隧道通风照明设计规范》^[1]虽然给出了几种导流叶片的类型,但对其“导流”的效果,国内外还未见过全面、系统的研究,风道系统的局部优化就更加无从谈起。由于条件所限,通过模型实验方法研究公路隧道通风弯道局部效应,不仅费时费力,而且在模型建立、实验方法和过程等方面都存在难度。所以,应用数值模拟的方法对公路隧道通风弯道局部效应进行研究是十分必要且可行的^[6]。

3 计算模型及参数

弯曲风道几何形状及导流叶片的类型见图 2,相应的有限元数值模拟几何模型如图 3。为了最大限度保证有限元计算精度及模型规模的一致性,单个模型单元数均按照 40 000 进行控制且各模型单元数相差不得超过 5%。上述图中 R 为联络风道断面半径; D 为水力直径; r 为弯曲段内壁半径; L 为弯道部分来流在经过弯曲前后的影响长度,一般取水力直径 $D=4.7$ m 的 20~40 倍^[10],本文 $L=150$ m。

物理条件:空气密度取 1.225 kg/m^3 ;隧道内平均温度 20 $^{\circ}\text{C}$;粘性系数为 1.789×10^{-5} kg/m ;其余如表 1。

表 1 数值模拟的物性参数和边界条件

Table 1 Physical parameter and boundary condition of numerical simulation

隧道外界 参考压力 (Pa)	弯道内平 均温度 ($^{\circ}\text{C}$)	摩阻损 失系数	空气密度 (kg/m^3)	运动粘性 系数 ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)	进口风速 (m/s)
101 325	20	0.02	1.205	$1.813 5 \times 10^{-5}$	20

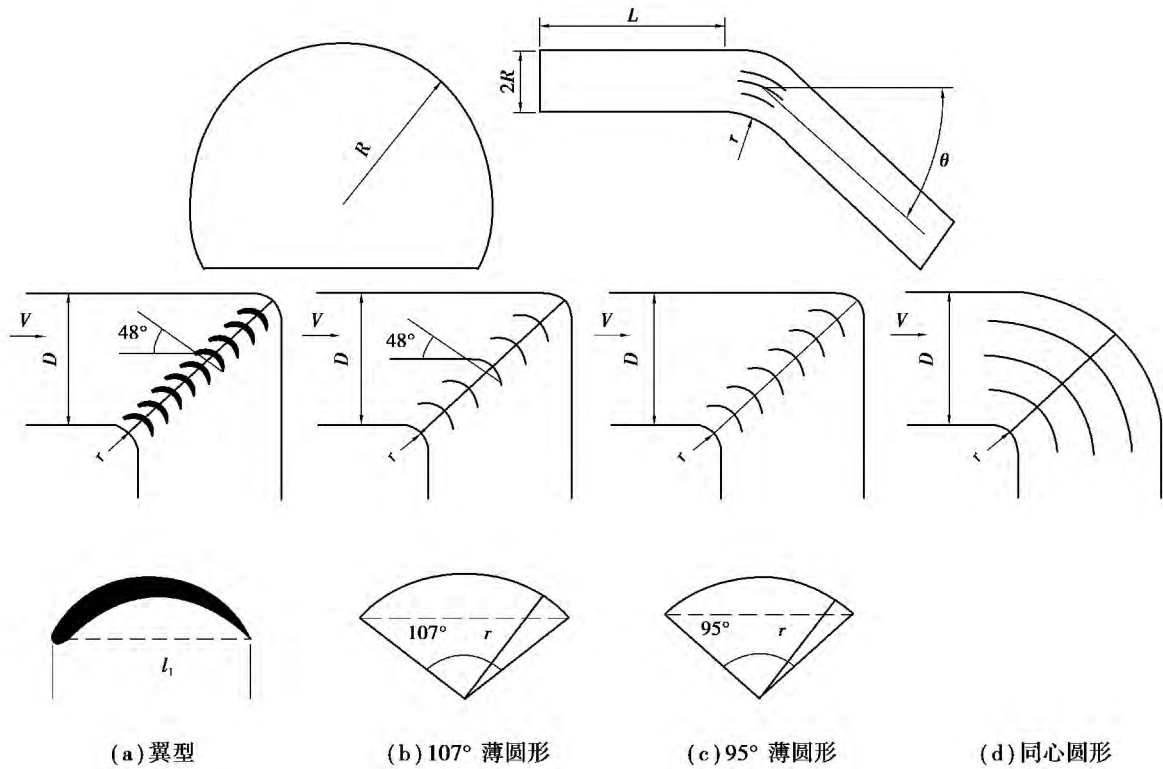


图 2 通风弯道及导流叶片图示

Fig. 2 The diagram of bending-duct and diversion vanes

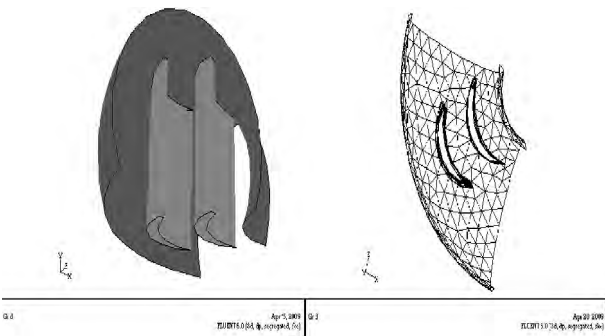


图 3 弯曲风道有限元模型

Fig. 3 The FED model of bending-ducts

模型工况: 依据《公路隧道通风照明设计规范》^[1], 建立不同角度、不同当量半径比的弯道及设置(不设置)导流叶片直弯风道。

4 局部损失系数计算及可靠性验证

对于公路隧道通风弯道局部损失系数 ζ , 一般有经验公式解和数值解两种。《公路隧道通风照明设计规范》^[1] 给出了部分不含导流叶片弯道局部损失系数 ζ 的经验公式及参考值, 如式 1^[1]:

$$\zeta_{\text{经}} = (0.131 + 0.1632 \times (D/r)^{7/2}) \cdot (\theta/90^\circ)^{1/2} \quad (1)$$

式中: D 为水力直径; r 为弯曲段内壁半径; θ 为弯曲角度。

但是, 对于含导流叶片直弯风道局部阻力损失系数, 《规范》^[1] 仅给出了一个大致范围值, 因而无法进行比选优化。鉴于此, 本文拟利用流体动力学 (CFD) 技术计算得到沿程压力损失数值解 (ΔP_a (Pa/m)) 及弯道模型进出口压力的数值解 (P_{in} 及 P_{out} (Pa)) 继而通过式 2 计算弯道的局部阻力损失系数 $\zeta_{\text{模}}^{\text{[10-14]}}$ 。

$$\zeta = \frac{2(P_{in} - P_{out} - l\Delta P_a)}{\rho V^2} \quad (2)$$

式中: ρ 为隧道内空气密度 (kg/m^3) ; V 为弯道内风速 (m/s) ; 弯曲段弧长 $l = 2L + \pi r \theta / 180$, $2L$ 为来流经过弯曲前后的影响长度; θ 为弯曲角度。

本次计算运用流体动力学软件 FLUENT6.0 (双方程模型) 对通风弯道局部损失进行数值模拟分析^[15,16]。

通过计算, 图 4 示出了对应不同角度、不同当量半径比 r/D 的弯道局部阻力系数经验公式值及数值模拟结果对比曲线。图 5 给出了弯曲风道流场及总压场云图。

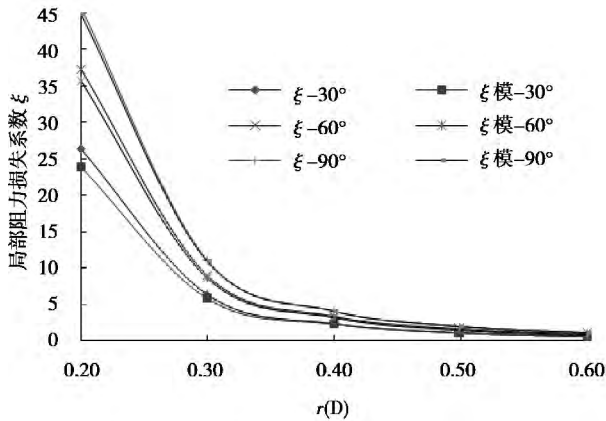


图 4 各角度弯曲风道在不同 r/D 下的局部阻力损失系数
Fig. 4 The local loss coefficients of bending-ducts with different degree in the case of different r/D

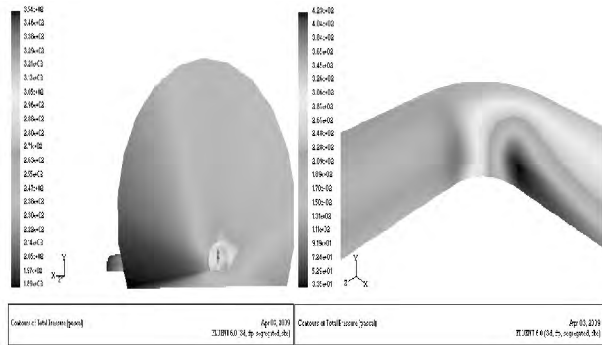


图 5 弯曲风道流场及总压场云图

Fig. 5 Contours of the flow field and full pressure in the bending-duct

对比弯道局部阻力损失系数经验公式 1 解及本文数值模拟结果所得曲线(图 4),发现 $\xi_{模}$ 与 ξ 趋近程度较好,最大相对误差为 9.12%。故可认为本文有限元模型规模选取比较恰当,所得数据具有合理性及可用性。

类似的方法,利用有限元数值模拟方法得出设置同心圆型、翼形、107°薄圆形、95°薄圆形导流叶片的直弯风道局部阻力系数^[15,10,16]。图 6 给出了部分直弯风道流场和压力场云图。

5 分析及讨论

将上述计算得到所有结果分别汇总于图 7、8,仔细分析可以得到:

(1) 90°弯曲风道加设和未加设各类型导流叶片的局部阻力损失系数均随 r/D 增大而减小。

(2) 随着弯曲风道当量半径比 r/D 的逐渐增大,且:①同心圆型导流叶片在 r/D 大于 0.2 时,开始起阻碍作用;②翼型导流叶片只有在 r/D 约

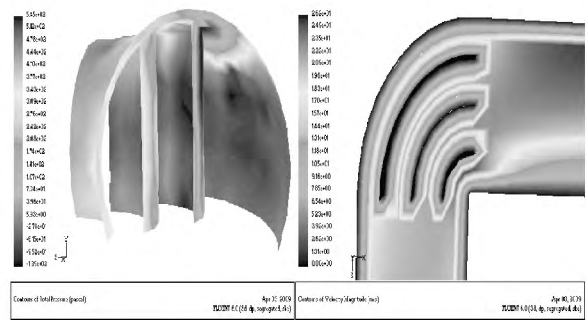


图 6 含导流叶片 90°弯道流场及总压场云图

Fig. 6 Contours of the flow field and full pressure in the 90° bending-ducts with the diversion vane

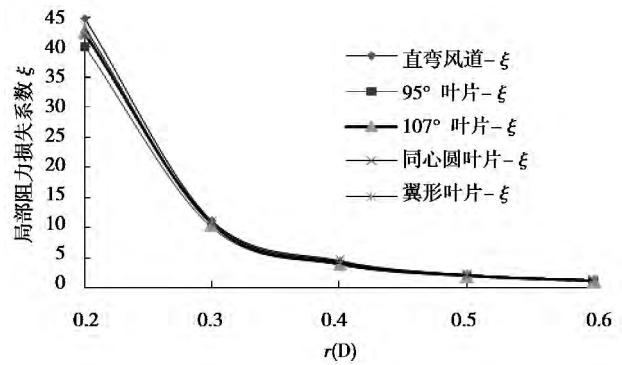


图 7 直弯风道加设各型叶片导流效果

Fig. 7 Comparison of the diversion effects in the 90° bending-ducts with different vanes

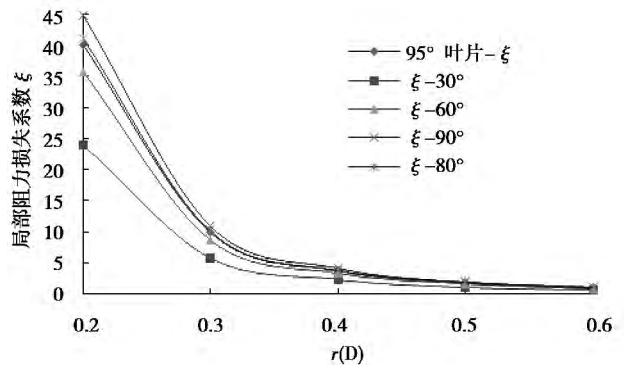


图 8 95°导流叶片与各角度弯曲导流效果

Fig. 8 Comparison of the diversion effects of 95° thin circular vane in bending-ducts with different degree

0.33 ~ 0.47 内能够呈现较好的导流效果;③无论 r/D 如何变化,含 107°、95°叶片风道局部阻力损失始终小于不含叶片的风道,其中 95°叶片在规范所列叶片类型中效果最佳。

(3) 如图 8 示,95°导流叶片局部阻力损失系数曲线与各角度弯曲风道局部阻力损失曲线较为相似甚至于接近,因此可以推断在 60° ~ 90° 某角度弯曲风道可替代含 95°导流叶片风道。为此,通

过进一步的研究表明,80°弯曲风道完全可以代替加设导流叶片的直角弯曲风道。

6 结 论

通过对公路隧道通风弯道局部阻力损失系数的系统性研究,得到以下结论:

(1) 直弯风道内局部阻力损失系数与叶片类型及直弯参数(r/D)密切相关;

(2) 导流叶片对于直弯风道的导流降耗效能,只有在合适的叶片类型及直弯参数(r/D)选取条件下才能发挥;

(3) 80°弯曲风道代替加设导流叶片的直角弯曲风道完全可行。

上述结论还有待通过下阶段研究工作的开展进一步深入研究和完善。

参考文献(References)

- [1] 中华人民共和国交通部. 公路隧道通风照明设计规范(JTJ 026.1-1999) [S]. 北京:人民交通出版社, 2000. (Ministry of Communications of the People's Republic of China. Specifications for design of ventilation and lighting of highway tunnel(JTJ 026.1-1999) [S]. Beijing: China Communications Press, 2000. (in Chinese))
- [2] Allen R. Tunnel operations [J]. Tunnel Management International, Vol. 6, No. 4, 2003.
- [3] Oud, Ir H. J. C. Safety measures reduce risk in Dutch road tunnels [J]. Tunnels and Tunnelling. Vol. 20, No. 6, Jun, 1988, p64-66.
- [4] 王日升. 美蓊林纵向通风公路隧道数值模拟与研究 [D]. 北京:北京工业大学, 2003. (Wang Risheng. Study and numerical simulation of longitudinal ventilation of Meihulin highway tunnel [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2003. (in Chinese))
- [5] 王永东, 夏永旭. 公路隧道纵向通风系统局部影响数值模拟 [J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 31(3): 50-54. (Wang Yongdong, Xia Yongxu. Parts effect numerical simulation of longitudinal ventilation system of highway tunnel [J]. Journal of Xi'an Highway University, 2001, 31(3): 50-54. (in Chinese))
- [6] 石平. 公路隧道通风局部效应三维数值模拟分析与研究 [D]. 西安:长安大学, 2004. (Shi Ping. Three-dimensional numerical simulation analysis and research of the local effect [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese))
- [7] 夏永旭, 戴国平. 现代公路隧道的发展 [A]//全国公路隧道学术会议论文集 [C] 2001. (Xia Yongxu, Dai Guoping. The development of the modern road tunnel [A]//Highway Tunnel Scholarship Conference Collection [C] 2001. (in Chinese))
- [8] 李跃军. 雪峰山特长公路隧道通风三维 CFD 局部仿真优化 [J]. 公路工程, 2008, 33(2): 521-525. (Li Yuejun. 3-D numerical simulation of partial ventilation optimizing of Xuefengshan extra-long highway tunnel [J]. Highway Engineering, 2008, 33(2): 521-525. (in Chinese))
- [9] 赵懿, 贺益英. 直角 Z 形组合双弯管流动特性的研究 [J]. 水利学报, 2006, 37(7): 778-783. (Zhao Yi, He Yiyang. Hydraulic characteristics of Z-type pipe combination with two similar rectangular bends [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(7): 778-783. (in Chinese))
- [10] 胡敏良. 流体力学(第3版) [M]. 武汉理工大学出版社, 2008. (Hu Minliang. Magnetohydrodynamics (3rd edition) [M]. Wuhan University of Technology Press, 2008. (in Chinese))
- [11] Donald S. Miller. Internal flow [M]. BHRA, 1971.
- [12] Sujan Sami, Jie Cui. Numerical study of resource losses in close-coupled fittings [J]. HVAC&R Research. Vol 10, No. 4, Oct. 2004.
- [13] William J. Rahmeyer, P. E. Pressure loss coefficients for close-coupled pipe [J]. Ells. ASHRAE Transaction: Research. 4535(RP-1035).
- [14] William J. Rahmeyer, P. E. Pressure loss data for large pipe ell reducers and expansions [J]. ASHRAE Transaction: Research. 4533(RP-1034).
- [15] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004. (Wang Fujun. Computational fluid dynamics analysis—fundamental principles and practical applications of software CFD [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [16] 李峰. 公路隧道通风弯曲风道及火灾排烟风口优化研究 [D]. 西安:长安大学, 2009. (Li Feng. Study on the optimization of bending-duct in road tunnel and smoke outlets' layout in fire [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese))