

文章编号: 1002-0268 (2009) 05-0086-05

曲线公路隧道射流风机布置方式优化研究

王峰¹, 王明年¹, 邓园也²

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘要: 为分析小半径曲线隧道射流风机布置方式对风机升压折减效率的影响, 优化曲线公路隧道射流风机布置方式, 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。结果表明, 改变并列风机组横向位置, 以隧道断面轴对称线为基准向隧道内侧移动 0.5 m 风机折减效率最高, 其余位置风机折减效率不同程度下降; 在满足隧道内建筑限界要求的基础上, 风机组离拱顶越远风机折减效率越大; 曲线隧道内, 风机射流受到曲壁面的影响, 射流特性较直线隧道更为复杂, 风机诱导段距离约为 90 m, 风机组纵向间距应大于 100 m。

关键词: 隧道工程; 曲线隧道; 数值模拟; 射流风机; 升压折减效率

中图分类号: U453.5

文献标识码: A

Research on Optimal Distribution of Jet Fans in Curvy Tunnel

WANG Feng¹, WANG Mingnian¹, DENG Yuanye²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: To analyze the influence of the distribution of jet fans on the pressure-rise coefficient in curvy tunnel with small radius and find the optimal distribution of the jet fans, the CFD method was carried out to simulate and analyze the jet characteristics for some cases of various distributions of jet fans. The results show that (1) the pressure-rise coefficient is the largest when the fans are moved 0.5 m toward the inside from the centerline of the tunnel and other positions make the coefficient smaller. (2) the coefficient increases with the increase of the distance between jet fans and the ceiling of tunnel based on meet the request of the construction clearance; (3) the jet characteristics in curvy tunnel are more complicated than those in straight tunnel due to the constraint of the curvy walls, the distance of inductive ventilation is about 90 m and the longitudinal distance between jet fans should be more than 100 m.

Key words: tunnel engineering; curvy tunnel; numerical simulation; jet fan; pressure-rise coefficient

0 引言

公路隧道通风系统用于排除隧道内污染物, 保证良好的运营环境^[1]。隧道中射流风机位置的优化及摩阻损失折减效率的确定直接影响隧道通风系统设计的可靠性。曲线隧道中, 隧道内空气流动及隧道结构特点较直线隧道有较大差别, 射流风机的射流特性也相应发生改变。规范^[2]未对曲线隧道尤其小半径曲线隧

道射流风机布置及折减效率作相应的说明。目前, 国内外对射流风机布置方式及折减效率的研究主要集中在直线隧道, 曲线隧道射流风机射流特性和风机布置方式及折减效率还需进一步研究^[3-8]。因此, 本文结合北京至昆明高速公路四川境内双螺旋隧道(干海子隧道和铁寨子 1 号隧道) 实际工程项目, 采用计算流体力学软件 FLUENT 对小半径曲线隧道射流风机布置方式及折减效率进行研究。其中, 2 条隧道均位于四

收稿日期: 2008-04-17

基金项目: 交通部西部交通建设科技资助项目 (200831800058)

作者简介: 王峰 (1982-), 男, 江西吉安人, 博士研究生, 研究方向为隧道及地下工程。(wfl982625@163.com)

川省石棉县栗子坪乡孟获村, 干海子隧道左右线分别长 1 690 m 和 1 755 m, 铁寨子 1 号隧道左右线分别长 2 778 m 和 2 931 m, 属于长隧道, 2 条隧道平面位于 $R=600.96\sim 619.67$ m 的圆曲线上, 最大横向超高 5%, 国内目前尚属首例。

1 曲线隧道射流通风的射流特性

曲线隧道内风机射流是一种有限空间射流, 与自由湍流射流有极大的不同; 较直线隧道相比, 由于断面风速分布的不均匀性及隧道壁面的变化使射流扩散过程更为复杂。

根据隧道内射流通风系统特点及紊流射流的基本特性^[9], 仍可采用单元通风段对其进行分析。单元通风段由射流混掺卷吸作用的诱导通风段和压力通风段组成, 增压效应和诱导效应是射流的 2 种通风效应, 如图 1 所示。曲线隧道内, 无论诱导通风段还是压力通风段均为非均匀流动, 这与直线隧道在压力通风段一般为均匀流动有较大差别。直线隧道诱导通风段中, 诱导效应和增压效应是并存的, 这一点在曲线隧道中仍然存在, 增压效应的结束标志着诱导通风段的结束和压力通风段的开始。

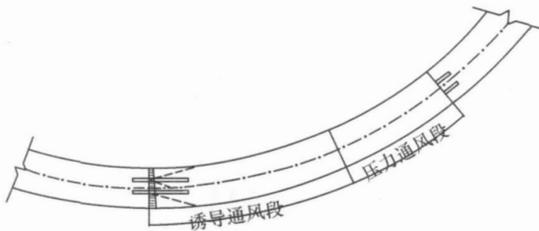


图 1 曲线隧道单元通风段流动结构

Fig. 1 Structure of the element ventilation in curvy tunnel

射流的增压效应使射流动能不断向势能转化, 在诱导段的末端断面平均压力达到最大。计算中, 单台射流风机的升压力 Δp_j 可用式 (1) 表示, 射流风机的位置摩阻损失折减系数 η 用式 (2) 表示^[2], 即

$$\Delta p_j = p_{j+} - \Delta p, \quad (1)$$

$$\eta = \Delta p_j / \left[\rho_j^2 \frac{A_j}{A_r} \left(1 - \frac{v_r}{v_j} \right) \right], \quad (2)$$

式中, p_{j+} 为计算模型中风机的实际升压力; Δp 为计算模型中沿程阻力损失; A_r 为隧道断面积; A_j 为射流风机出口面积; v_j 为射流风机出口风速; v_r 为隧道内通风速度。

2 控制方程和数值方法

2.1 控制方程

公路隧道内风速不大, 压力变化较小, 因此, 可以将隧道内空气流动视为三维、粘性、不可压、定常湍流流动。湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型。设 Φ 为流场某一参数, 对某一控制容积, 流场控制方程可以写成如下统一形式^[10], 即

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho U\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S, \quad (3)$$

式中, 当 $\Phi=1, U, e, k, \varepsilon$ 时, 式(3) 分别表示连续性方程、动量方程、能量方程、湍动能方程和湍动能耗散率方程; Γ 和 S 分别为广义扩散系数及广义源项。

2.2 数值方法

对流场中任一控制容积, 式(3) 离散方程的一般形式可以写成

$$a_P \Phi_P = \sum_{j=1}^n a_j \Phi_j + s, \quad (4)$$

式中: a, s 分别为随空间差分格式的不同而不同的参数。本文采用 SIMPLE 算法。

2.3 边界条件

为考虑隧道内设计风速, 隧道入口定义为速度入口边界条件, 速度大小为设计风速, 隧道出口定义为流量边界条件; 风机入口定义为流量边界条件, 风机出口定义为速度入口边界条件, 速度大小为风机的出口风速; 隧道壁面定义相应粗糙度的壁面, 风机壁面为光滑壁面。

3 风机布置方式及折减效率研究

干海子隧道、铁寨子 1 号隧道均位于半径为 600~625 m 的圆曲线上, 2 条隧道曲率半径较小, 世界罕见。为减小计算规模, 本文采用半径 600 m, 长度 330 m 的隧道模型, 风机选用 NO90 型号射流风机。计算模型见图 2。



图 2 隧道和风机几何模型

Fig. 2 Model of the tunnel and the jet fans

3.1 验证计算

为验证本文采用的数值计算模型和方法的正确性, 对中梁山隧道射流风机的增压效应进行数值计算, 并将数值结果与实测数据进行对比^[3], 如表 1 所示。

从计算结果可知, 数值计算结果与实测结果吻合较好, 两者相差 0.93%, 说明本文所采用的方法是合理准确的。

表1 数值结果与现场实测比较

Tab 1 Comparison between field and computational results

A_j/m^2	A_f/m^2	$v_j/(m \cdot s^{-1})$	$v_f/(m \cdot s^{-1})$	实测 η	数值计算 η	误差/%
51.70	0.64	1.73	28.44	0.848	0.856	0.93

3.2 风机组断面布置方式研究

3.2.1 断面风机组横向位置

综合考虑断面并列风机间距 α 及风机组在断面的横向位置对射流风机折减效率的影响, 本文对多种工况进行计算, 计算结果见表2。

表2 风机折减效率计算

Tab 2 Calculation of coefficient

间距 α/m	折减效率 $\eta/\%$				
	左移 1.0 m	左移 0.5 m	对称分布	右移 0.5 m	右移 1.0 m
2.0	83.0	84.1	84.1	83.0	81.0
2.4	81.6	85.2	83.7	81.3	80.7
2.8		84.9	84.5	82.5	

当风机间距为 2.8 m 时, 并列风机组左移或右移 1.0 m 风机过于靠近隧道壁面, 因此本文未进行计算。从计算结果得出以下几点结论:

- (1) 并列风机组向隧道内侧移动即左移 0.5 m 时, 风机折减效率较对称分布时均有所提高, 提高的程度与风机间距有关, 风机间距为 2.4 m 时, 风机效率增大最为明显。
- (2) 当并列风机组左移 1.0 m 时, 风机折减效率有不同程度的降低。
- (3) 无论风机间距的大小, 并列风机组向隧道外

侧右移时, 风机折减效率均有较大的降低, 且右移的距离越大, 即越靠近隧道外侧壁面, 风机折减效率下降越大。

(4) 并列风机间距在一定范围内变化时, 其对风机折减效率的影响不大。

3.2.2 断面风机组竖向位置

分别设置风机轴线与拱顶之间距离 L_2 与射流风机直径 D 的比值为 1.77、1.5 和 1.2, 对应风机与建筑限界距离 L_1 为 15、39、66 cm。计算结果见表3。

表3 风机折减效率计算

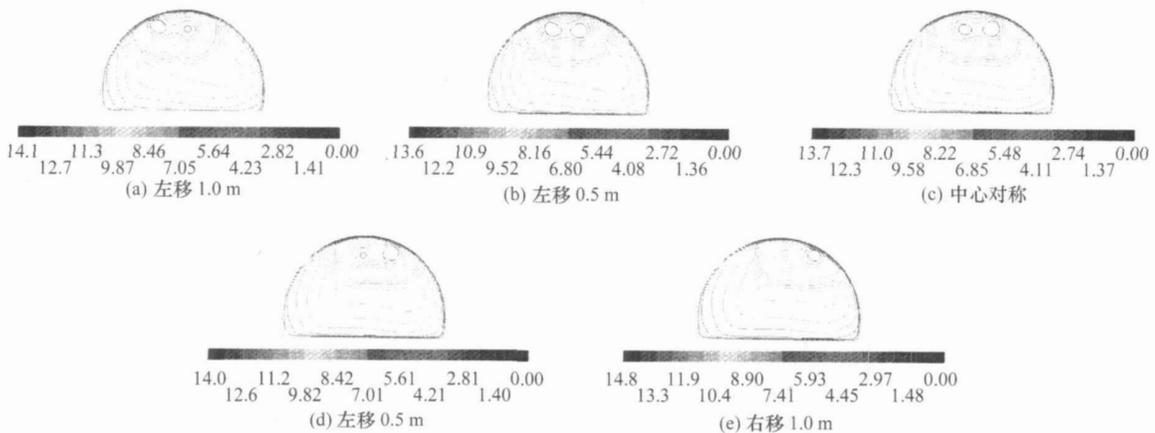
Tab 3 Calculation of coefficient

L_2/D	L_1/cm	折减效率 $\eta/\%$	
		间距 2.4 m	间距 2.8 m
1.77	15	83.7	84.5
1.5	39	81.2	80.6
1.2	66	75.8	76.0

计算结果表明, 并列风机组的竖向位置对射流风机的折减效率有较大影响。无论风机间距的大小, 风机折减效率随 L_2/D 的增大而增大。射流风机应尽量布置于远离拱顶的位置。

3.2.2 射流扩散特性分析

为进一步分析并列风机组在断面位置的变化对射流扩散的影响, 以风机组为 2.4 m 为例, 图3给出了风机组在断面不同位置离风机入口 20 m 处断面速度分布。

图3 各断面风速分布 ($\alpha = 2.4 m$) (单位: m/s)Fig. 3 Velocity distributions of different sections ($\alpha = 2.4 m$) (unit: m/s)

从图3中可以看出, 风机组位于断面不同位置的射流扩散过程。风机组左移 0.5 m 时, 2 个高速主射流区的射流扩散最为充分, 其受隧道壁面的影响相对最小, 有利于提高射流风机的诱导通风效果。当风机组中心对称或右移时, 靠近隧道外侧高速主射流区均

受到隧道外侧壁面的影响, 右移的距离越大影响的程度越严重。当风机组左移 1.0 m 时, 靠近隧道内侧高速主射流的扩散受隧道内侧壁面的影响加剧。受隧道壁面影响射流扩散不够充分直接影响射流的能量转换, 降低了风机的折减效率。

3.3 风机组纵向布置研究

射流通风效应主要与射流的作用和风机进口段吸入流动状态有关。完善的吸入条件和充分发展的射流是射流风机正常工作的必要条件。根据以往对直线隧道风机吸入段研究可知, 吸入段长度较短, 因此曲线隧道中仍可采用直线隧道吸入段长度 $l_{st} = d_e$, 一般不大于 $10\text{ m}^{[3-4]}$ 。

根据以上分析, 增压效应的结束标志着诱导通风段的结束和压力通风段的开始。图 4 给出了风机间距为 2.4 m 时, 并列风机对称分布和左移 0.5 m 时, 沿射流方向断面平均压力的变化过程。

从图 4 可以看出, 诱导通风段内具有明显的增压效应, 无论风机在横断面位置布置如何, 沿射流风机出口 90 m 时, 断面平均压力达到最大。随后进入压力通风段, 压力逐渐减小。风机组纵向间距须大于 100 m 。从图 4 还可知, 在风机出口 50 m 处出现一拐点, 断面压力呈现一定程度的下降。

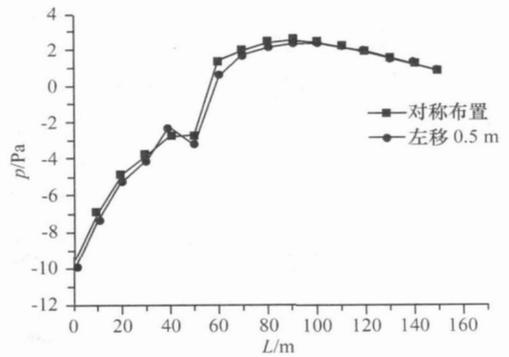


图 4 纵向断面平均压力变化

Fig. 4 Average pressure variation of the longitudinal section

图 5 给出了拐点处断面速度的矢量图。从图 5 可以看出, 在断面左拱肩和右拱腰附近均出现了较大的涡流, 增大了能量的损失。拐点后, 诱导段内增压效应重新占据主导作用, 断面平均压力逐渐升高。

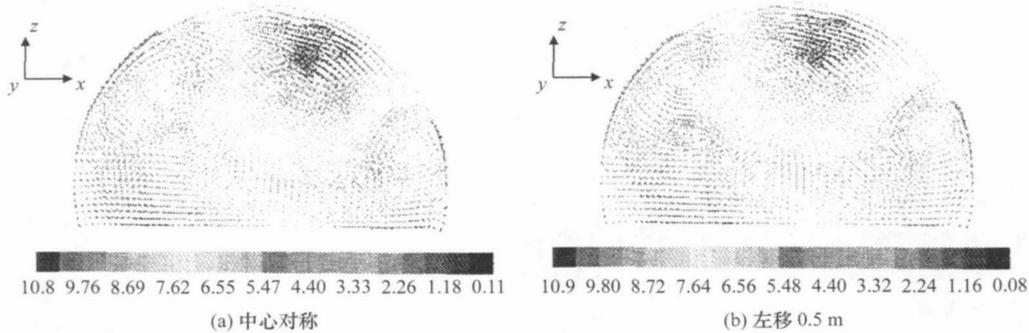


图 5 拐点处断面速度矢量图 (单位: m/s)

Fig. 5 Velocity vector at the inflexion position (unit: m/s)

4 结论

(1) 曲线隧道内改变并列风机组横向位置时, 向隧道内侧移动 0.5 m 风机折减效率有所提高, 其余位置风机折减效率不同程度的下降。

(2) 改变并列风机组竖向位置时, 风机组距拱顶越远风机折减效率越大。

(3) 曲线隧道内, 风机诱导段距离约为 90 m , 风机组纵向间距应大于 100 m 。

(4) 干海子隧道和铁寨子 1 号隧道选用 NO90 射流风机, 风机间距为 2.4 m , 风机组向隧道内侧移动 0.5 m 时, 风机折减效率达到最大, 为 85.2% 。

参考文献:

References:

[1] BARI S, NASER J. Simulation of Smoke from a Burning Vehi-

cle and Pollution Levels Caused by Traffic Jam in a Road Tunnel [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2005, 20 (3): 281-290.

[2] 中华人民共和国交通部. JTJ 026. 1-1999 公路隧道通风照明设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1999.

P. R. China Ministry of Communications JTJ 026. 1-1999 Design Code of Ventilation and Lighting of Highway Tunnel [S]. Beijing: China Communications Press, 1999.

[3] VEGA M G, ARG ELLES K M, FERN NDEZ J M, et al. Numerical 3D Simulation of a Longitudinal Ventilation System: Memorial Tunnel Case [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 23 (5): 539-551.

[4] CHEN T Y, LEE Y T, HSU C C. Investigations of Piston Effect and Jet Fair-effect in Model Vehicle Tunnels [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 73 (2): 99-110.

[5] JANG Hongming, CHEN Falin. On the Determination of the Aerodynamica Coefficients of Highway Tunnals [J]. Journal of

- Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90 (8): 869- 896.
- [6] 重庆市重点公路建设指挥部, 西南交通大学. 公路长隧道纵向通风研究 [R]. 1998
Chongqing Key Road Construction Office, Southwest Jiaotong University. Research on Longitudinal Ventilation in Long Tunnel of Road [R]. 1998.
- [7] 高孟理, 武金明, 孙三祥. 隧道射流通风系统的优化分析 [J]. 中国公路学报, 2007, 15 (3): 64- 67.
GAO Mengli, WU Jinming, SUN Sanxiang. Optimization Analysis of Tunnel Ventilation System with Jet Fans [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 15 (3): 64- 67.
- [8] 孙三祥, 高孟理, 武金明, 等. 双向行车公路隧道射流通风系统优化分析 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (12): 106- 110.
SUN Sanxiang, GAO Mengli, WU Jinming, et al. Optimization Analysis of Two-direction Road Tunnel Ventilation System with Jet Fan [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (12): 106- 110.
- [9] 谢象春. 湍流射流理论与计算 [M]. 北京: 科学出版社, 1975.
XIE Xiangchun. Theory and Computation of Turbulent Fluidics [M]. Beijing: Science Press, 1975.
- [10] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
TAO Wenquan. Numerical Heat Transfer [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.

(上接第85页)

梁悬索桥建设提供了1种新的思路, 具有重要的工程意义和参考价值。

参考文献:

References:

- [1] 中交公路规划设计院. 坝陵河大桥钢桁加劲梁施工图设计 [Z]. 北京: 中交公路规划设计院, 2006.
CCCC Highway Consultants Co., Ltd. Detail Design of Steel Stiffening Truss Girder of Baling River Bridge [Z]. Beijing: CCCC Highway Consultants Co., Ltd., 2006.
- [2] 严国敏. 现代悬索桥 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
YAN Guomin. Modern Suspension Bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [3] 王忠彬, 沈锐利, 唐茂林. 悬索桥钢桁架加劲梁施工方法分析 [J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19 (1): 117- 121.
WANG Zhongbin, SHEN Ruili, TANG Maolin. Construction Methods Analysis of the Steel Truss Stiffening Girder of Suspension Bridge [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2006, 19 (1): 117- 121.
- [4] 日本道路公团. 关门桥工事报告书 [R]. 东京: 日本道路公团, 昭和52年.
Japan Highway Public Corporation. Construction Report of Kanmon Bridge [R]. Tokyo: Japan Highway Public Corporation, 1977.
- [5] Honshu-Shikoku Bridge Authority. The Akashi-Kaikyo Bridge, Design and Construction of the World's Longest Bridge [R]. Kobe: Honshu-shikoku Bridge Authority, 1998.
- [6] 广东虎门技术咨询有限公司. 濠户大桥工程总结 [R]. 广州: 广东虎门技术咨询有限公司, 1998.
Guangdong Humen Engineering Consultants Co., Ltd. Seto Ohashi Bridge Project Summary [R]. Guangzhou: Guangdong Humen Engineering Consultants Ltd., 1998.
- [7] 陈明宪. 湘西矮寨特大桥梁方案选型与景观研究 [J]. 中外公路, 2007, 27 (4): 109- 114.
CHEN Mingxian. Research on Conceptual Design of Xiangxi Aizhai Bridge [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2007, 27 (4): 109- 114.
- [8] 中交公路规划设计院. 坝陵河大桥钢桁架梁施工架设方案研究报告 [R]. 北京: 中交公路规划设计院, 2005.
CCCC Highway Consultants Co., Ltd. Research on Erection Methods of Steel Stiffening Truss Girder of Baling River Bridge [R]. Beijing: CCCC Highway Consultants Co., Ltd., 2005.