

# 公路隧道射流风机调压数值模拟分析与优化研究\*

石平<sup>1,2</sup>, 夏永旭<sup>1</sup>

(1. 长安大学隧道工程安全研究所, 西安 710064; 2. 湖北省交通规划设计院, 武汉 430051)

**摘要:** 运用有限元数值模拟方法对公路隧道纵向通风中射流风机的安装位置进行了三维数值模拟与分析。并以综合影响系数  $K$  作为评价指标, 分别对一台、两台及三台风机的情况进行了模拟计算与分析。给出了公路隧道通风射流风机安装的高度、间距、影响长度以及最佳编组数量的具体建议值。

**关键词:** 公路隧道; 纵向通风; 数值模拟; 优化

中图分类号: U458.1      文献标识码: A      文章编号: 1673-0836(2013)增1-1722-04

## Numerical Simulation Analysis and Optimization Research of the Voltage Regulation of Jet Fan in Highway Tunnel

Shi Ping<sup>1,2</sup>, Xia Yongxu<sup>1</sup>

(1. Institute of Tunnel Engineering Safety, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Hubei Provincial Communications Planning and Design Institute, Wuhan 430052, China)

**Abstract:** By means of the finite element numerical simulation, the article gives a 3-D numerical simulation and analysis of the installation position of jet fan for longitudinal ventilation in railway tunnel. And with the comprehensive effect coefficient  $K$  as the evaluation index, there have some simulations and analysis of the cases for one fan, two fans and three fans. Last, the article gives the concrete suggested values for fan installation about the height, effecting length and optimal grouping number in railway tunnel.

**Keywords:** highway tunnel; longitudinal ventilation; numerical simulation; optimization

## 1 引言

近年来采用全射流或射流风机加竖、斜井的纵向分段通风方式成为长大公路隧道通风的主要模式<sup>[1~3]</sup>。众所周知,射流风机的主要功用是用作隧道内的调压,但射流风机的安装位置直接影响到通风效果。本文拟采用有限元数值模拟方法,以常见的两车道隧道为例,对公路隧道纵向通风中射流风机的编组效果、安装位置调压影响长度进行数值模拟与分析,提出射流风机最佳安装的建议。

## 2 几何模型及分析方法

数值模拟分析方法采用有限元单元法,基本方

程为  $K \sim \varepsilon$  双参数紊流方程<sup>[4~6]</sup>数值计算模型以及相关尺寸、变化参数如图1所示,计算工况分为增压和降压两种情况。具体研究的内容分为:

- ①不同风机数量风机的调压效果;
- ②不同风机安装高度的调压效果;
- ③不同风机安装间距的调压效果;
- ④不同风机安装方案的影响长度。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 综合影响系数 $K$

为了分析不同风机数量、不同风机安装高度、不同风机安装间隔、不同风机工况时的通风效果,我们引入一个综合影响系数  $K$ ,其表达式为:

\* 收稿日期: 2013-09-13(修改稿)

作者简介: 石平(1977-),男,硕士,高级工程师,主要从事公路隧道勘察与设计方面的研究工作。

E-mail: yongxuxia@126.com

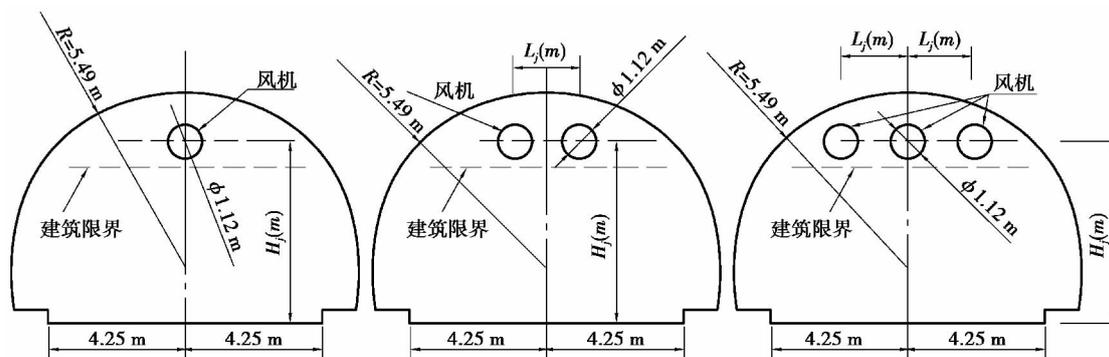


图 1 射流风机横截面安装尺寸示意图

Fig. 1 The schematic diagram of jet fan cross-section installation dimension

$$K = \frac{P_{j\text{模拟}}}{P_{j\text{理论}}} \quad (1)$$

$$P_{j\text{模拟}} = \Delta P_{\text{沿程}} - P_{1\text{入口}} \quad (2)$$

$$P_{j\text{理论}} = \rho \times V_j^2 \times \frac{A_j}{A_r} \times \frac{V_j - V_r}{V_j} \quad (3)$$

式中:  $K$  为综合影响系数;  $P_{j\text{模拟}}$  为模拟计算压力值, Pa;  $P_{j\text{理论}}$  为理论计算压力值, Pa;  $\Delta P_{\text{沿程}}$  为沿程压力损失, Pa;  $P_{1\text{入口}}$  为隧道入口静压力, Pa;  $\rho$  为空气密度, 计算取  $1.205 \text{ kg/m}^3$ ;  $V_j$  为风机出口风速, m/s;  $A_j$  为风机出口面积,  $\text{m}^2$ ;  $A_r$  为隧道静空面积,  $\text{m}^2$ ;  $V_r$  为隧道内风速, m/s。

### 3.2 计算结果分析

通过大量的数值计算, 得到不同风机数量、不同风机安装高度、不同风机安装间隔、不同风机工况时射流风机综合影响系数  $K$  值见表 1。对不同风机组合的不同工况时风机调压影响长度计算结果见表 2。

通过分析上述计算结果我们可以得出以下主要结论:

(1) 分析所有的计算工况下射流风机的调压效果, 可以看到综合影响系数  $K$  的变化范围为  $0.7 \sim 1.0$ , 并且始终小于  $1.0$ 。说明射流风机的实际调压值小于理论值。

(2) 无论是射流风机的风流与隧道风流同向还是与隧道风流反向, 单台风机的调压效果远远好与两台和三台风机并联。所以从通风效果的角度出发, 如果隧道内的射流风机数不多时, 建议每组布置一台风机。

(3) 无论是单台风机还是两台、三台并联风机, 风机风流和隧道风流同向工况下, 风机安装高度愈底  $K$  值愈大, 而在反向工况时, 风机的安装高度可以比同向工况高  $0.20 \text{ m}$ 。但随着并联风机台

数的增加, 风机安装高度对综合影响系数  $K$  的影响越来越小。

(4) 多台风机并联时, 风机在横断面上的安装间距对  $K$  值影响较大。当风机风流与隧道风流相同情况, 无论是两台风机并联安装还是三台风机并联, 风机安装的轴线间距宜取  $2.0 \text{ m}$ ; 风机风流与隧道风流相反情况, 风机的轴线间距宜取  $1.5 \text{ m}$ 。

(5) 射流风机的调压影响长度随着风机台数和工况的不同而相差较大。但当风机风流与隧道风流同向时, 风机入口段的影响长度为  $3.0 \sim 4.0 \text{ m}$ , 出口段的影响长度为  $94.0 \sim 116.0 \text{ m}$ ; 当风流相反时, 入口段的影响长度为  $72.0 \sim 91.0 \text{ m}$ , 出口段影响长度为  $18.0 \sim 28.0 \text{ m}$ 。

## 4 结束语

(1) 射流流风机的调压作用受风机台数、安装高度、相互间距等因素的影响, 在具体布置风机时, 必须根据实际隧道的几何与通风参数进行优化研究予以确定;

(2) 如果风机数量不多, 可以每组布置一台为佳;

(3) 风机的安装间距根据风流工况取  $1.5 \sim 2.0 \text{ m}$ ;

(4) 在布置射流风机的位置时, 应充分发挥射流风机的调压功能以及在隧道火灾时的排烟作用<sup>[7,8]</sup>。风机组相距应该不小于  $120.0 \text{ m}$ , 考虑风机安装机电设施费用, 对于数量较多的风机组数, 建议风机安装间距不宜大于  $200 \text{ m}$ 。

(5) 本文的研究仅针对单向交通两车道直线隧道, 对于两车道曲线隧道, 结果肯定有所变化, 但幅度不会大; 而对于三车道、四车道隧道, 其风机横向安装间距可以调整, 但纵向间距应该不变。

表1 射流风机调压效果数值模拟计算结果汇总表

Table 1 The summary of numerical simulation results for voltage regulation effect at jet fan

项目		风机型号 APR-1120/403								
工况	风机数量	组别	安装高度	风机间距	隧道入口静压	沿程损失	模拟计算结果	理论计算结果	综合影响系数	
	$X$	$N$	$H_j$ (m)	$L_j$ (m)	$P_1$ (Pa)	$\Delta P$ (Pa)	$P_j$ (Pa)	$P_j$ (Pa)	$K$	
增压	1	1	5.48	0	-12.411 6	4.789 5	17.201 1	18.671 9	0.921 2	
		2	5.68		-12.088 7	4.789 5	16.878 2	18.671 9	0.903 9	
		3	5.84		-11.865 8	4.789 5	16.655 3	18.671 9	0.892 0	
		4	6.00		-11.738 8	4.789 5	16.528 3	18.671 9	0.885 2	
		5	6.16		-11.485 7	4.789 5	16.275 2	18.671 9	0.871 6	
		6	6.32		-11.216 4	4.789 5	16.005 8	18.671 9	0.857 2	
		7			1.520	-29.229 7	4.789 5	17.009 6	18.671 9	0.911 0
		8			2.000	-29.371 3	4.789 5	17.080 4	18.671 9	0.914 8
		9	5.68		3.116	-29.325 8	4.789 5	17.057 7	18.671 9	0.913 5
		10			4.216	-28.969 6	4.789 5	16.879 5	18.671 9	0.904 0
		11			5.316	-28.049 5	4.789 5	16.419 5	18.671 9	0.879 4
降压	1	12	5.48	0	26.863 8	4.789 5	-22.074 3	-23.953 4	0.921 6	
		13	5.68		27.210 8	4.789 5	-22.421 3	-23.953 4	0.936 0	
		14	5.84		27.185 9	4.789 5	-22.396 4	-23.953 4	0.935 0	
		15	6.00		27.017 6	4.789 5	-22.228 1	-23.953 4	0.928 0	
		16	6.16		26.982 3	4.789 5	-22.192 8	-23.953 4	0.926 5	
		17	6.32		27.007 0	4.789 5	-22.217 5	-23.953 4	0.927 5	
		18			1.520	48.604 0	4.789 5	-21.907 2	-23.953 4	0.914 6
		19			2.000	44.829 2	4.789 5	-20.019 9	-23.953 4	0.835 8
		20	5.68		3.116	43.918 2	4.789 5	-19.564 4	-23.953 4	0.816 8
		21			4.216	44.556 4	4.789 5	-19.883 5	-23.953 4	0.830 1
		22			5.316	49.092 5	4.789 5	-22.151 5	-23.953 4	0.924 8
增压	3	23	5.48	2.0	-47.535	4.789 5	17.4416 4	18.671 9	0.934 1	
		24	5.68		-47.064	4.789 5	17.284 5	18.671 9	0.925 7	
		25	6.08		-46.464	4.789 5	17.084 5	18.671 9	0.915 0	
		26			1.520	-46.907 0	4.789 5	17.232 2	18.671 9	0.922 9
		27	5.68		2.000	-47.064	4.789 5	17.284 5	18.671 9	0.925 7
		28			2.500	-47.110 6	4.789 5	17.300 0	18.671 9	0.926 5
降压	3	29	5.48	2.0	57.205 9	4.789 5	-17.472	-23.953	0.729 4	
		30	5.68		57.526 4	4.789 5	-17.579	-23.953	0.733 9	
		31	6.08		56.934 7	4.789 5	-17.382	-23.953	0.725 6	
		32			1.520	65.205 5	4.789 5	-20.139	-23.953	0.840 7
		33	5.68		2.000	57.526 4	4.789 5	-17.579	-23.953	0.733 9

表 2 不同工况时风机调压的长度及综合影响系数

Table 2 The length of fan voltage regulation and comprehensive effect coefficient under different working conditions

项目	风机 型号	组别	风机 台数	隧道 风速	隧道入 口静压	沿程 损失	入口影 响长度	出口影 响长度	综合影 响系数	备 注
工况	No.	N		$V_r$ (m/s)	$P_1$ (Pa)	$\Delta P$ (Pa)	$L_1$ (m)	$L_2$ (m)	$K$	水力直径 $D=8.34\text{ m}$
同向	63	1	1	4.00	-1.316 9	4.301 2	3.0	94.0	0.942 1	$\rho = 1.205\text{ kg/m}^3$ $V_j = 34.3\text{ m/s}$
		2	1	4.25	-0.806 6	4.789 5	3.0	97.0	0.946 2	$A_j = 0.312\text{ m}^2$
		3	1	4.96	0.787 5	6.302 6	3.0	100.0	0.955 1	$A_r = 65.52\text{ m}^2$
	100	4	1	4.00	-9.321 1	4.301 2	3.0	94.0	0.906 7	$\rho = 1.205\text{ kg/m}^3$ $V_j = 34.3\text{ m/s}$
		5	1	4.25	-8.786 2	4.789 5	3.0	100.0	0.911 1	$A_j = 0.636\text{ m}^2$
		6	1	4.96	-7.079 8	6.302 6	3.0	103.0	0.919 9	$A_r = 65.52\text{ m}^2$
		7	2	4.00	-16.815	4.301 2	4.0	105.0	0.900 4	$\rho = 1.205\text{ kg/m}^3$ $V_j = 34.3\text{ m/s}$
		8	2	4.25	-16.183	4.789 5	4.0	111.0	0.901 7	$A_j = 0.786\text{ m}^2$
		9	2	4.96	-14.337	6.302 6	4.0	116.0	0.908 8	$A_r = 65.52\text{ m}^2$
反向	90	10	2	4.00	18.937	4.301 2	83.0	22.0	0.952 5	$\rho = 1.205\text{ kg/m}^3$ $V_j = 34.3\text{ m/s}$
		11	2	4.25	19.483	4.789 5	78.0	21.0	0.950 0	$A_j = 0.985\text{ m}^2$
		12	1	4.96	21.175	6.302 6	72.0	19.0	0.944 2	$A_r = 65.52\text{ m}^2$
	112	13	1	4.00	26.765	4.301 2	89.0	28.0	0.943 9	$\rho = 1.205\text{ kg/m}^3$ $V_j = 34.3\text{ m/s}$
		14	1	4.25	27.307	4.789 5	83.0	25.0	0.940 1	$A_j = 1.227\text{ m}^2$
		15	1	4.96	29.102	6.302 6	78.0	22.0	0.934 6	$A_r = 65.52\text{ m}^2$
		16	1	4.00	23.175	4.301 2	91.0	22.0	0.919 1	$\rho = 1.205\text{ kg/m}^3$ $V_j = 25\text{ m/s}$
		17	1	4.25	23.729	4.789 5	84.0	20.0	0.914 5	$A_j = 1.540\text{ m}^2$
		18	2	4.96	25.498	6.302 6	78.0	18.0	0.904 9	$A_r = 65.52\text{ m}^2$
同向	125	19	2	24.3	-5.367 9	4.789 5	4.0	69.0	0.923 9	$\rho = 1.205\text{ kg/m}^3$ $V_r = 4.25\text{ m/s}$
		20	2	29.3	-10.264	4.789 5	4.0	73.0	0.908 9	$A_j = 0.786\text{ m}^2$
		21	2	34.3	-16.183	4.789 5	4.0	79.0	0.901 7	$A_r = 65.52\text{ m}^2$

参考文献(References)

[1] 曾艳华,何川. 特长公路隧道全射流通风技术的应用[J]. 公路 2002 (7):129-131.  
 [2] 舒宁 徐建闽 钟汉枢,等. 计算流体力学在纵向式公路隧道火灾通风中的仿真[J]. 水动力学研究与进展 2001 ,16(4):511-516.  
 [3] 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.  
 [4] 石平. 公路隧道通风局部效应数值模拟分析与研究

[D]. 西安: 长安大学 2004.  
 [5] 王永东 夏永旭. 长大公路隧道纵向通风数值模拟研究[J]. 中国公路学报 2000 ,15(1):82-85.  
 [6] 王永东 夏永旭. 公路隧道纵向通风局部数值模拟研究[J]. 西安公路交通大学学报 2001 21(4):50-54.  
 [7] 方银钢 朱合华 闫治国. 上海长江隧道火灾疏散救援措施研究[J]. 地下空间与工程学报 2010 ,6(2):418-422.  
 [8] 袁建平 方正 程彩霞,等. 隧道火灾时拱顶最高烟气温度的实验研究[J]. 地下空间与工程学报 2010 ,6(5):1 094-1 097.