

新二郎山隧道通风系统局部结构优化研究*

张辉川¹, 马佳¹, 韩兴博², 柴伦磊², 刘霁²

(1.新疆维吾尔自治区 交通规划勘察设计研究院, 乌鲁木齐 830006; 2.长安大学 公路学院, 西安 710064)

摘要:新二郎山隧道长 13.4 km, 采用四斜井三区段分段纵向式通风。为了降低隧道运营期间的通风能耗, 通过数值模拟对隧道通风系统中的渐缩风道长度以及渐缩角度、渐扩风道长度以及渐扩角度、弯曲风道弯曲角度进行了优化; 借鉴泥巴山隧道竖井自然风通道经验, 增设自然风通道排水设施与风道控制风门, 设计了新二郎山隧道的自然风通道; 利用 CFJZ6 通风机综合测试仪对隧道通风系统渐扩段建成后的局部阻力损失系数进行了现场实测。根据优化结果推荐其渐缩段风道渐缩角度为 10°, 风道长度为 6.8 m; 渐扩段风道渐扩角度为 10°, 风道长度为 24.1 m; 弯曲风道弯曲角度 80°。优化后渐扩段局部阻力系数为 0.100 7 远小于优化前的 0.380 2。

关键词:隧道, 通风系统, 局部阻力损失, 数值模拟, 现场实测

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)01-0287-07

Optimization of the New Erlangshan Tunnel Ventilation System Local Structure

Zhang Huichuan¹, Ma jia¹, Han Xingbo², Chai Lunlei², Liu Ji²

(1. Xinjiang Communication Planning Survey and Design Institute, Urumchi 830006, P.R. China;

2. Highway College, Chang'an University, Xi'an 710064, P.R. China)

Abstract: The length of the new Erlangshan tunnel is 13.4km, and a 3-section with 4-shaft ventilation system was applied in this tunnel. In order to decrease the energy assumption during the tunnel operation, a numerical simulation method was used to optimize the local structure of the ventilation system including the length and angle of cross section increasing duct, the length and angle of cross section decreasing duct and the curve angle of the curve duct. Take advantage of the nature ventilation duct building experience of Nibashan tunnel, the air control doors and drainage facilities were designed for the Erlangshan tunnel nature ventilation duct. The CFJZ6 ventilator comprehensive testers was used in the field test to examine the effectiveness of the optimization results. From the study, the recommended results are listed-length of cross section increasing duct is 6.8 m and its angle is 10°, and the length of cross section decreasing duct is 24.1 m and its angle is 10°. And the curve angle of curve duct is 80°. From the in situ test, the local resistance coefficient of optimized duct is 0.100 7, which is much smaller than the 0.380 2 before optimization.

Keywords: tunnel; ventilation system; local resistance coefficient; numerical simulation; in situ test

0 引言

当公路隧道采用排、送组合纵向通风、横向通

风或半横向通风时,为了使风流按预定的路线方式流动,必须根据具体情况设置完备的风道系统。在这些风道系统中,存在着许多诸如排(送)风段、联

* 收稿日期:2018-08-19(修改稿)

作者简介:张辉川(1977-),男,新疆乌鲁木齐人,高级工程师,主要从事隧道设计工作。E-mail:912191005@qq.com

基金项目:交通运输部建设科技项目(2013318802400)

络风道段、风机房扩(缩)压段等结构变化区域,气流在流经这些区域时,会因为相互碰撞而形成尺度很大的横向旋涡。这些横向旋涡很大程度上耗费了隧道通风工程中风机所提供的风压,导致通风费用的增加。因此,如何科学合理地设计隧道运营后的通风体系,充分发挥其安全高效的服务功能,获取最大的社会经济效益,俨然已成为一个重要课题^[1-3]。

国内外学者通过数值分析、现场监测、理论推导等手段对隧道通风阻力做了大量的研究,并且取得了丰硕的成果。蒋树屏^[4]以浙江某隧道为工程依托,研究了送排风口的构造、形状、角度及间距,认为排风口应设计成稍呈喇叭状(扩角 12°)的形状。夏永旭等^[5]、石平等^[6],结合《雁门关公路隧道运营通风与防灾技术研究》,采用理论分析、现场测试及数值模拟等方法,对三通局部阻力损失、送排风短道的优化进行了研究,得到了一系列有益于通风设计的结论。李峰等^[7]通过数值模拟研究了隧道弯曲风道弯曲角度及导流叶片对风道阻力系数的影响。秦慧敏^[8]认为在三通中对压力损失有影响的因素是结构形状、支管与主管的夹角、支管与总管的面积比和流量比。方磊等^[9]测试了排风口与隧道轴向夹角对排风段隧道平均风速的影响。郝海仙^[10]以实验为手段对城市道路隧道顶部竖井通风效果进行了研究,得出当通风竖井的倾斜角度为 90° 时,排风量最小。《公路隧道通风设计细则》^[11]中指出,合理的隧道风道渐扩角度为 $6\sim 10^\circ$ 。然而,对通风系统中局部结构相关参数的研究尚未有一个系统的研究。

本文以新二郎山隧道为工程依托,首先使用有限元软件对隧道通风系统中的渐缩风道长度以及渐缩角度、渐扩风道长度以及渐扩角度、弯曲风道弯曲角度进行了优化,借鉴泥巴山隧道竖井自然风通道经验,增设自然风通道排水设施与风道控制风门。在此基础上,利用 CFJZ6 通风机综合测试仪对隧道通风系统渐扩段建成后的局部阻力损失系数进行了现场实测。

1 工程概况

新二郎山隧道是雅安至康定高速公路重大控制性工程之一,隧道长约 13.4 km,采用四斜井三区段分段纵向式通风,雅安端左线斜井长 2 280 m,右线斜井长 3 038 m,康定段左线斜井长 1 734 m,康定端右线斜井长 1 710 m。

本隧道通风土建系统以 2028 年为界,分期实施。近期(2028 年前)实施雅安端右线风井和康定

端左线风井,左右线运营工况均采用两区段通风,火灾工况采用三区段排烟;远期(2028 年后)实施雅安端左线风井和康定端右线风井,左右线运营工况均采用三区段通风,火灾工况采用三区段排烟。图 1 为新二郎山隧道通风整体方案图。

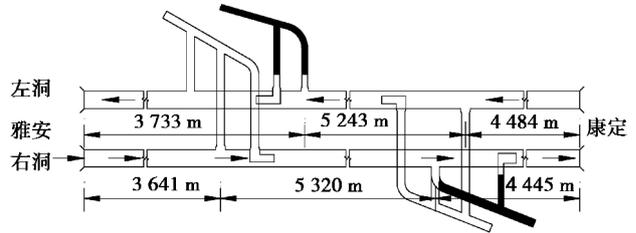


图 1 新二郎山通风方案示意

Fig. 1 Ventilation scheme of the tunnel

在新二郎山隧道通风设计方案中,左洞排风道渐扩角度为 12° ,风道长度为 20 m;渐缩角度为 13.487° ,风道长度为 5 m;弯曲风道的弯曲半径为 20 m,角度为 82.74° ,弯曲弧长为 20.88 m。

2 隧道通风局部结构数值模拟

为了优化隧道的通风系统局部结构,本节采用数值模拟手段对各局部结构进行优化设计,以局部阻力系数来判断系统的优化优劣。

2.1 局部阻力系数计算

以渐扩段为例,建立一个如图 2 所示的渐扩段实体模型。根据气体的连续方程,可得出入口 1-1 两个截面的风流速度比 $V_2 : V_1$ 。结合数值模拟分析,可得到模型两端的压力差 P_{12} ($P_{12} = P_1 - P_2$),并将其代入式(1)计算得到突扩段局部的损失系数。

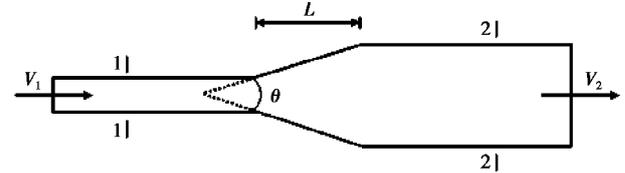


图 2 渐扩计算模型

Fig. 2 Calculation model of proper expanding duct

渐扩段局部损失系数 ζ 为:

$$\zeta = \frac{2A_2^2 H_j}{\rho Q_2^2} = \frac{2H_j}{\rho v_2^2}, \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; A_2 为截面 2-2 的面积, m^2 ; H_j 为突扩局部阻力损失,Pa; Q_2 为流经截面 2-2 的流量, m^3/s ; v_2 为截面 2-2 的速度, m/s 。

2.2 计算参数

计算模型的物理参数均为标准状况下的空气参数,其值如表1所示。

表1 空气物理参数值

Table 1 Air physical parameter values

空气密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^3)$	空气绝对粘性 $\mu/\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$	温度 $t/^\circ\text{C}$	参考压力 P/Pa
1.205	1.813×10^{-5}	20	101 325

2.3 渐扩风道数值模拟

以新二郎山隧道左洞渐扩风道为实体,建立如图3所示的计算模型。

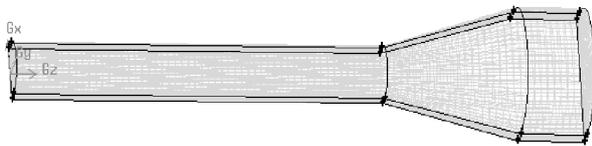


图3 新二郎山隧道渐扩风道计算模型

Fig. 3 Calculation model of the increasing part

根据现场实测数据,空气密度 ρ 取 $1.03 \text{ kg}/\text{m}^3$, 壁面摩擦系数 λ 取 0.024 。进口采用速度入口边界条件,出口采用自由出流边界条件。计算结果如表2所示。

表2 新二郎山隧道渐扩风道计算结果表

Table 2 Calculation result of the increasing part

	流量/ $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	平均速率/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	静压/ Pa	动压/ Pa	总压/ Pa
入口	71.41	2.973	0.014	4.557	4.572
出口	-71.41	0.793	0.934	0.532	1.466

计算得渐扩风道局部阻力损失系数 $\zeta = 0.3802$ 。

2.4 渐缩风道数值模拟

以新二郎山隧道左洞渐缩风道为实体,建立如图4所示的计算模型。

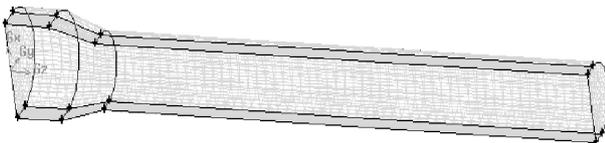


图4 新二郎山隧道渐缩风道计算模型

Fig. 4 Calculation model of the decreasing part

根据实测数据,空气密度 ρ 取 $1.03 \text{ kg}/\text{m}^3$, 壁面摩擦系数 λ 取 0.024 。进口采用速度入口边界条件,出口采用自由出流边界条件。计算结果如表3所示。

表3 新二郎山隧道渐缩风道计算结果表

Table 3 Calculation result of the decreasing part

	流量/ $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	平均速率/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	静压/ Pa	动压/ Pa	总压/ Pa
入口	91.453	1.994	0.043	2.048	2.092
出口	-91.453	3.312	-8.058	5.889	-2.168

计算可得渐缩风道局部阻力损失系数 $\zeta = 0.2754$ 。

2.5 弯曲风道数值模拟

以新二郎山隧道左洞送风道内的弯曲风道为实体,建立如图5所示的计算模型。

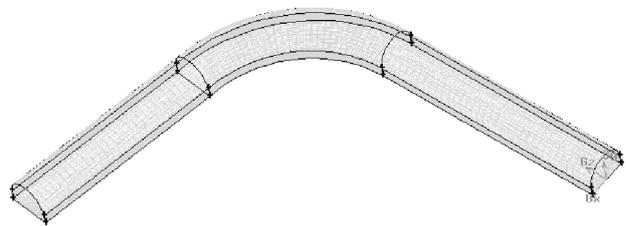


图5 新二郎山隧道弯曲风道计算模型

Fig. 5 Calculation model of the curve duct

根据实测数据,空气密度 ρ 取 $1.03 \text{ kg}/\text{m}^3$, 壁面摩擦系数 λ 取 0.024 。进口采用速度入口边界条件,出口采用自由出流边界条件。计算结果如表4所示。

表4 新二郎山隧道弯曲风道计算结果表

Table 4 Calculation result of the curve duct

	流量/ $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	平均速率/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	静压/ Pa	动压/ Pa	总压/ Pa
入口	71.314	2.983	0.012 8	4.584	4.597
出口	-71.314	2.744	-2.308	3.971	1.662

计算可得弯曲风道局部阻力损失系数 $\zeta = 0.1894$ 。

3 新二郎山隧道通风系统优化

3.1 渐扩风道优化

在新二郎山隧道通风设计方案中,左洞排风道渐扩角度 θ 约 12° ,风道长度为 20 m 。

根据文献[11]研究结果,在不改变施工难度的情况下,将渐扩角度 θ 设计为 10° ,则风道长度变为 24.1 m 。此时,建立新的渐扩模型,并进行数值计算。计算结果如表5所示。

表 5 新二郎山隧道渐扩风道优化后计算结果表

Table 5 Optimized calculation result of the increasing part

	流量/ (kg · s ⁻¹)	平均速率/ (m · s ⁻¹)	静压/ Pa	动压/ Pa	总压/ Pa
入口	71.358	2.999	-0.003	4.632	4.628
出口	-71.358	0.706	2.089	0.364	2.454

计算可得渐扩风道局部阻力损失系数 $\zeta = 0.193 3$ 。

将此结果与设计值相比,可知:将渐扩角度 θ 设计为 10° ,风道长度变为 24.1 m 时,渐扩局部阻力损失系数可降低 0.186 9。

3.2 渐缩风道优化

在新二郎山隧道通风设计方案中,左洞排风道渐缩角度 θ 为 13.487° ,风道长度为 5 m。

根据文献[12],在不改变施工难度的情况下,将渐缩角度 θ 设计为 10° ,则风道长度变为 6.8 m。建立新的渐缩模型,并进行数值计算。计算结果如表 6 所示。

表 6 新二郎山隧道渐缩风道优化后计算结果表

Table 6 Optimized calculation result of the decreasing part

	流量/ (kg · s ⁻¹)	平均速率/ (m · s ⁻¹)	静压/ Pa	动压/ Pa	总压/ Pa
入口	91.453	1.994	0.033	2.048	2.081
出口	-91.453	3.306	-7.884	5.869	-2.011

计算可得渐缩风道局部阻力损失系数 $\zeta = 0.249 8$ 。

将此结果与设计值相比,可知:将渐缩角度 θ 设计为 10° ,风道长度变为 6.8 m 时,渐缩局部阻力损失系数可降低 0.025 6。

3.3 弯曲风道优化

在新二郎山隧道通风设计方案中,左洞送风道弯曲角度 θ 为 82.736° ,弯曲半径 $R=20$ m。

根据文献[12]研究结果,在不改变施工难度的情况下,将弯曲角度 θ 设计为 80° 。建立新的渐缩模型,并进行数值计算,计算结果如表 7 所示。

表 7 新二郎山隧道弯曲风道优化后计算结果表

Table 7 Optimized calculation result of the curve duct

	流量/ (kg · s ⁻¹)	平均速率/ (m · s ⁻¹)	静压/ Pa	动压/ Pa	总压/ Pa
入口	71.314	2.983	0.012	4.584	4.597
出口	-71.314	2.822	-2.467	4.189	1.722

计算得到弯曲风道局部阻力损失系数 $\zeta = 0.181 1$ 。

将此结果与设计值相比,可知:将弯曲角度 θ 设计为 80° 时,弯曲局部阻力损失系数可降低 0.008 3。

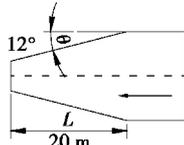
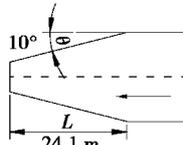
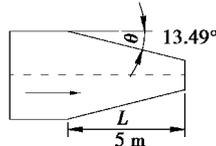
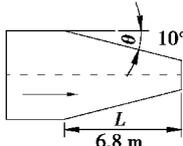
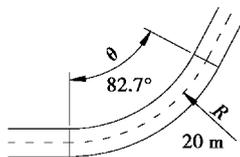
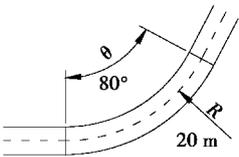
3.4 优化结果汇总

将对新二郎山隧道各系统的原设计与优化结果对比如表 8。

经计算,对新二郎山隧道的四处竖井均进行上述优化后可降低轴流风机功率 153 kW,年节约电费约 78 万元^[12]。

表 8 新二郎山隧道优化结果汇总

Table 8 Optimized results of Erlangshan tunnel

局部结构	设计值	拟优化值	原设计图	优化设计图
左洞渐扩风道	渐扩角度 θ 约 12° 风道长度 $L=20$ m	渐扩角度 θ 约 10° 风道长度 $L=24.1$ m		
左洞渐缩风道	渐缩角度 θ 为 13.487° 风道长度 $L=5$ m	渐缩角度 θ 为 10° 风道长度 $L=6.8$ m		
弯曲风道	弯曲角度 θ 为 82.736° 弯曲半径 $R=20$ m	弯曲角度 θ 为 80° 弯曲半径 $R=20$ m		

4 机房下部自然风通道优化

泥巴山隧道在其修建过程中在机房下部设计有自然风通道,如图6所示。该通道在轴流风机关闭情况下将隧道主洞与竖井联通,可利用自然通风改善隧道卫生环境。但该通道在轴流风机开启时存在风流短路的缺陷(图7),对火灾下的排烟及其他紧急情况下机械通风效果有较大隐患。另外,由于自然风通道地势较低,常年积水,对风机房的结构安全会产生一定影响。



图6 轴流风机房下部气流通道示意

Fig. 6 Air duct under axial fan

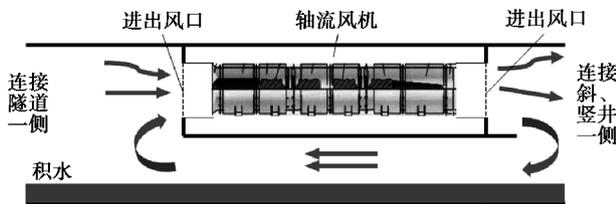


图7 通风短路示意

Fig. 7 Short circuit of the ventilation

建议新二郎山隧道修建风机房时借鉴泥巴山隧道的设计,在风机房排风道下部增设自然风道。同时,为了防止轴流风机开启时的通风短路,建议在此排风道设计一扇可以自动开启和关闭的风门。此外,必须考虑风道处积水排除。因此,对隧道的风机房下部排风通道进行了重新设计,如图8、9所示,在轴流风机房下部通道上设置闸门。一般情况下风机关闭,闸门处在打开状态,隧道通过轴流风机下部设置的通道与竖井相通,发挥其烟囱效应辅助隧道内的通风;当需要竖井通风或者发生紧急工况,开启轴流风机前封闭闸门便可以防止系统的通风短路。另外设置排水孔,排水孔内设置水泵,将通道内的积水

经由隧道主排水系统排出隧道,防止积水对结构的破坏以及对通风的影响。

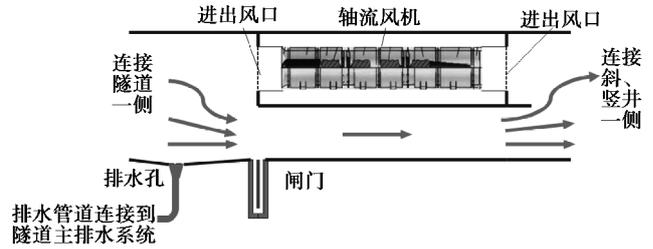


图8 利用竖井烟囱效应示意

Fig. 8 Situation in taking use of the chimney effect of vertical shaft

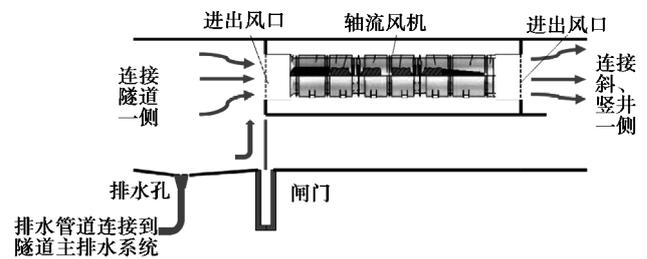


图9 采用轴流风机通风示意

Fig. 9 Situation in mechanical ventilation

5 通风系统优化效果现场实测

为了验证优化结果,对康定端斜井左洞排风道的渐扩段局部阻力系数进行了现场实测。

5.1 测试方案及仪器

测试的目的在于确定左洞排风道渐扩段(图10)的局部通风阻力。选取渐缩后的断面为测试断面(断面1),断面面积为44.5 m²,通过测定该断面上的风速,进而计算得到通风风量,依据连续性方

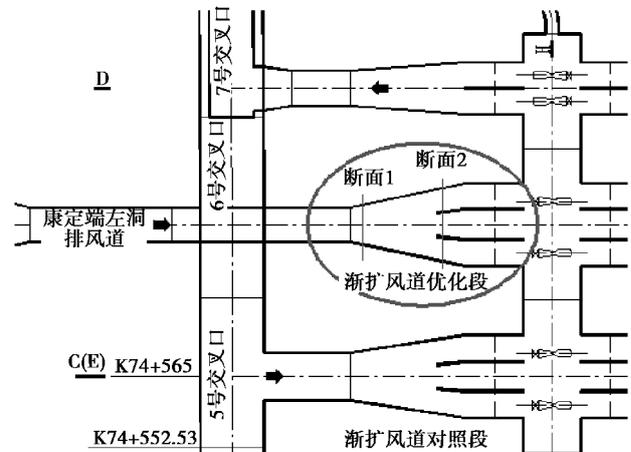


图10 渐扩风道示意图

Fig. 10 Schematic diagram of proper expanding duct

程即可得到断面变化前的断面(断面 2, 断面面积 90.47 m²)平均风速。两断面间的高差通过风道纵坡及断面间的距离计算得到。其测试断面测点布置如图 11、12 所示。



图 11 现场测点布置图

Fig. 11 Arrangement chart of test point in the filed

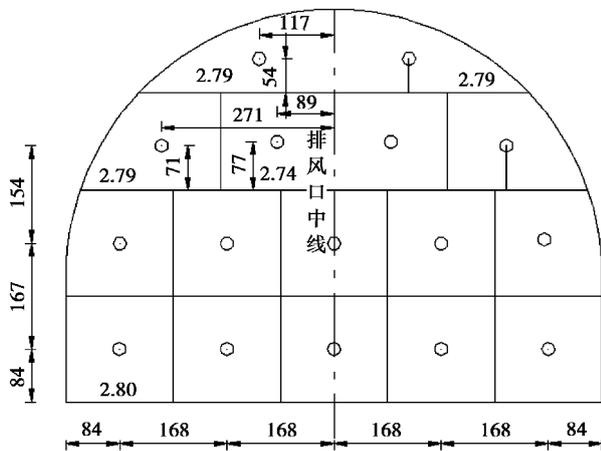


图 12 断面测点布置图

Fig. 12 Arrangement chart of test point

本次测试过程中,变化后断面的风速、大气压、温度和湿度采用 CFJZ6 型通风机综合测试仪进行测试,同时在变化前断面采用空盒气压计和温湿度表同步测量变化前断面的大气压和温湿度。现场测试过程如图 13~15 所示。



图 13 安装风杯

Fig. 13 Arrangement of the wind cup

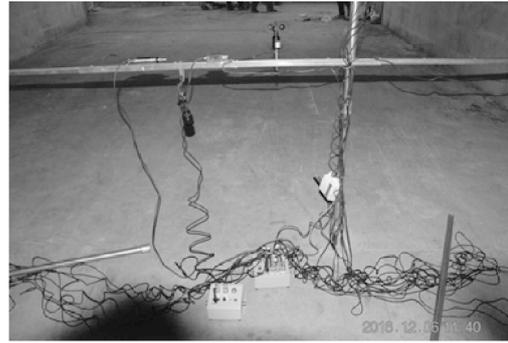


图 14 连接数据采集线及气压、温度传感器

Fig. 14 Data link and temperature and humidity sensor



图 15 数据采集系统

Fig. 15 Data collection system

5.2 结果计算

测试数据的处理步骤如下:

5.2.1 计算断面平均风速

将测试断面上的 16 个测点风速求平均值作为隧道断面的平均风速:

$$v_{1,avg} = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} v_i \quad (5)$$

式中: v_i 为测点 i 处的风速。

5.2.2 计算断面 2 的平均风速

根据连续性方程计算断面 2 的平均风速:

$$v_{2,avg} = \frac{A_1}{A_2} v_{1,avg} \quad (6)$$

5.2.3 空气密度 ρ

将测试数据代入空气密度计算式,计算断面 1 和断面 2 的空气密度:

$$\rho = 0.003483 \cdot \frac{P}{T} \cdot \left(1 - \frac{0.378 \cdot \varphi \cdot P_{sat}}{P} \right) \quad (7)$$

5.2.4 计算局部阻力损失

根据伯努利方程计算局部阻力损失:

$$h_f = \rho_2 \frac{v_{2,avg}^2}{2} + P_2 - \rho_1 \frac{v_{1,avg}^2}{2} - \left(P_1 - \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} gH \right) \quad (8)$$

式中: P_1, P_2 分别为断面 1 和断面 2 的大气压, Pa;

H 为断面 1 和断面 2 间的高程差, m。

5.2.5 计算局部阻力系数

$$\zeta = \frac{2h_f}{\rho v_{1,avg}^2} \quad (9)$$

式中: ζ 表示局部阻力损失系数; x 表示 A_2/A_1 , 其值为 0~1; y 表示渐缩角度 θ 。

最终计算得:

$$\zeta_{\text{康定端渐扩}} = 0.1007 \quad (10)$$

现场实测得局部阻力系数远远小于优化前的局部阻力系数 (0.3802), 可见, 优化效果较为明显, 优化方案现实可行。

6 结论

(1) 建议新二郎山隧道通风系统渐扩段风道渐扩角度为 10° , 风道长度为 24.1 m; 渐缩段风道渐缩角度为 10° , 风道长度为 6.8 m; 弯曲风道弯曲角度为 80° 。

(2) 对新二郎山隧道的四处竖井均进行上述优化后可降低轴流风机功率 153 kW, 年节约电费约 78 万元。

(3) 借鉴并完善了泥巴山隧道机房下部自然风道设计, 消除了通风短路隐患, 改善了风道排水条件。

(4) 新二郎山隧道尚在施工当中, 待后续渐缩风道以及弯曲风道具备测试条件后, 需对两者优化效果进一步现场实测。

参考文献 (References)

- [1] 杨超, 王志伟. 公路隧道通风技术现状及发展趋势[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4): 819-824. (Yang Chao, Wang Zhiwei. Current status and development trend of ventilation technology for highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(4): 819-824. (in Chinese))
- [2] 王艳, 王子云, 唐上明, 等. 多匝道公路隧道通风系统模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(3): 630-636. (Wang Yan, Wang Ziyun, Tang Shangming, et al. The simulation research of ventilation system of highway tunnel with several ramps[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(3): 630-636. (in Chinese))
- [3] 马佳. 长大公路隧道通风系统局部结构优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2015. (Ma Jia. Study on local structure optimization of ventilation system in long highway tunnel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese))
- [4] 蒋树屏. 公路隧道竖井送排风模式及其工程应用[J]. 世界隧道, 1998(4): 43-48. (Jiang Shuping. Ventilation and ventilation mode of highway tunnel shaft and its engineering application[J]. World Tunnel, 1998(4): 43-48. (in Chinese))
- [5] 夏永旭, 石平. 公路隧道扩(缩)径风道局部损失数值模拟[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 83-86. (Xia Yongxu, Shi Ping. Numerical simulation of local loss of highway tunnel expansion (shrinkage) diameter duct [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 83-86. (in Chinese))
- [6] 石平, 夏永旭. 公路隧道送排风短道流场数值分析及优化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2): 402-405. (Shi Ping, Xia Yongxu. Numerical analysis and optimization research of short duct flow field of outlet and inlet in highway tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(2): 402-405. (in Chinese))
- [7] 李峰, 夏永旭, 苟长飞. 公路隧道通风弯道设计优化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 455-459. (Li Feng, Xia Yongxu, Gou Changfei. Study on the design optimization of bending-duct in road tunnel [J]. Chinese Journal of underground space and engineering, 2014, 10(2): 455-459. (in Chinese))
- [8] 秦慧敏. 关于通风管三通的局部阻力系数问题[J]. 暖通空调, 1980(3): 10-13. (Qin Huimin. Local resistance coefficient of ventilation duct three pass [J]. Journal of HV & AC, 1980(3): 10-13. (in Chinese))
- [9] 方磊, 谢永利, 李宁军. 公路隧道竖井送排风排风口角度优化模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(5): 35-39. (Fang Lei, Xie Yongli, Li Ningjun. Study on the optimum angle between the exhausting duct orifice and the longitudinal axis of a highway tunnel with longitudinal ventilation through shafts by model test [J]. Modern Tunnelling Technology, 2005, 42(5): 35-39. (in Chinese))
- [10] 郝海仙. 城市道路隧道顶部竖井通风效果的优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. (Hao Haixian. Optimization of ventilation effect at the top of urban road tunnel [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道通风设计细则 (JTG/T D70/2-02-2014) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2014. (People's Republic of China industry recommended standard. Guidelines for design of ventilation of highway tunnels. (JTG/T D70/2-02-2014) [S]. Beijing: China Communications Press, 2014. (in Chinese)).
- [12] 新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院. 长大公路隧道通风系统局部结构优化研究[R]. 乌鲁木齐, 2016. (Xinjiang Communication Planning Survey and Design Institute. Local resistance factor optimization research on long-sized highway tunnel ventilation system [R]. Urumchi, 2016. (in Chinese))