

文章编号:1674-9669(2020)03-0080-10 DOI: 10.13264/j.cnki.ysjskx.2020.03.011

引文格式:张博文,王海宁,张迎宾.公路隧道空气幕与射流风机通风方法对比及优化[J].有色金属科学与工程,2020,11(3):80-89.

公路隧道空气幕与射流风机通风方法对比及优化

张博文^{1a,1b}, 王海宁², 张迎宾^{1b}

(1. 江西理工大学, a 资源与环境工程学院; b. 能源与机械工程学院, 江西 赣州 341000;

2. 中国计量大学质量与安全工程学院, 杭州 310018)

摘要:针对隧道射流通风存在功率利用率低,大浓度尾气调控不理想等问题,运用 FLUENT 软件,以模拟优化瓮福磷矿隧道的通风系统问题为实例,将射流风机和空气幕引射风流进行风流对比,提出引射风流空气幕替代射流风机加强隧道通风的全新命题。研究表明:两种优化风机组合都能达到隧道所需的通风标准,在进行对比过程中,如果总功率一样,引射风流空气幕组合产风量大于射流风机组合,而总功率 145.5 kW 空气幕组合可产生与总功率 180 kW 射流风机组合类似的通风效果,且总功率可节约 34.5 kW。在风机组合优化过程中,各风机功率分配越平均对风机组合通风效率提升越大,同种功率的风机两两并联,通风效果要优于不同功率风机两两并联。

关键词:空气幕;引射风流;射流风机;通风系统

中图分类号:TD726 **文献标志码:**A

Ventilation method comparison between air curtain and jet fan in highway tunnels and its optimization

ZHANG Bowen^{1a,1b}, WANG Haining², ZHANG Yingbin^{1b}

(1a. School of Resources and Environmental Engineering; 1b. Energy and Mechanical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. College of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In view of the low power efficiency and mediocre control of high-concentration exhaust gas in tunnel jet ventilation, the FLUENT software is used to simulate and optimize the current ventilation system in Wengfu Phosphate Mine Tunnel. A new proposition is put forward to use the ejection airflow air curtain instead of jet fan to strengthen tunnel ventilation after making comparisons between their airflows. The results show that two optimized fan combinations can meet the ventilation standards required of the tunnel. If the total power is the same, the ejection airflow air curtain combinations produces more air volumes than the jet fan, and the air curtain combinations with a total power of 145.5 kW can produce a similar ventilation effect as the jet fan combinations with a power of 180 kW, saving 34.5 kW in total. In the process of optimizing the fan combinations, it is found that the more even the power distribution of each fan, the greater ventilation efficiency of the fan combinations. The ventilation effect of two fans of the same power in parallel connection is better than that of two fans of different powers in parallel connection.

Keywords: air curtain; ejection airflow; jet fan; ventilation system

收稿日期:2020-03-30

基金项目:江西理工大学横向科技项目(201836010900030)

通信作者:王海宁(1965—),男,博士,教授,主要从事安全科学及工程领域研究。E-mail: whnfyy@163.com

射流风机作为特殊的一种轴流风机^[1],因为其布置灵活、资金成本较少等优点,在隧道实际通风项目中,一直受到专家学者的青睐。近几十年来无论在理论还是模拟方面,国内外学者对射流风机都有着大量的研究。在理论方面,赫海仙^[2]通过平板和风机的实验,说明了风机的安装距离不同和风机距离平板的间距能够很大程度影响平板受到阻力和风机的推力比。崔德振等^[3]采用了实地测量和模型实验的研究方法,对比不同汽车模型在压力差作用下形成风量和风速的变化情况,同时验证了自模区的存在临界雷诺数,为纵向射流风机模型的设置提供了方法。李晓菲等^[4]通过理论分析,发现影响纵向最小间距的影响因素主要分为 4 个方面,分别是叶轮直径,射流出口风速,风机轴线之间的横向间距以及风机与拱顶的接近度。邢利英等^[5]验证了在射流风机出口处增设收缩管的方法,从而提高隧道射流通风效率,能够很有效地改善隧道通风效果,作为通风优化的基本研究方法,对实际问题进行现场测试以及数值模拟,提出改进方案并得到优化效果的通风优化处理模式。在数值模拟方面。周家才等^[6]编制了一套纵向通风的程序模拟气流,对车辆阻力、污染物的浓度分布,进行了有效的分析,并且在实际中进行了运用。韩国的 Joon-Hyung 等^[7]在三维 PANS 和 PBA 代理模型的基础上提出了能够优化隧道射流风机性能的程序。国内 WANG F 等^[8]模拟探究弯曲公路隧道中射流风机的各个横截面位置对气流流场的影响,他们发现当风机和隧道顶棚的距离变化越来越大的时候射流速度越来越快,当射流风机和隧道壁的距离越来越近或者风机之间的距离越来越近时,风机需要更长的距离来运行。吴珂等^[9]模拟指出合理的洞口距可以避免进口气流和风机出口气流相互的影响,并且对射流通风的效果有良好的促进作用。

虽然射流风机在现今的隧道通风中研究较成熟,但随着研究的不断深入慢慢地也开始出现一些问题。例如,①射流风机在运行过程中存在能量利用率低、耗电量大、通风效率不高,尤其在大浓度的区域处理尾气不理想,很多时候达不到所需要的风流调控^[10]。②射流风机安装的位置主要是在隧道的顶部,虽然很大程度增加了车辆的行驶空间,但是,在清理维护方面会存在车辆伤害,对操作人员有着很大的危险性。③在传统射流风机安装过程时,风机安装高度对风机的通风效率有着很大影响,同时风机在运行过程中长时间承受风机动荷载,对风机支架和减震装置的安装也有一定技术的要求等。

据了解,一些井下大断面且长度大的巷道因为需

要采掘和运输,大型器械需要不断进出,同时还伴随着炮烟的冲击影响,巷道内的空气质量状况与长隧道相比有过之而无不及,而硐室型风流调控技术——空气幕能有效地解决此类问题^[11-13]。硐室型空气幕顾名思义安装在侧壁的硐室内的空气幕,由于安装位置的特殊,不仅不影响车辆运输,而且还可以实现对风流的增阻、引射、隔断的作用^[14-15]。现今,硐室型空气幕在矿井的研究和应用较多,在隧道通风中应用尚未见报告,但空气幕的特性决定其具有很广泛的运用领域,因此,论文以瓮福磷矿隧道通风为研究背景,运用 FLUENT^[16]进行模拟和分析,对比模拟过程中空气幕和射流风机在隧道中风量和风速变化状态,找到较优组合,为今后空气幕引射风流在隧道中的可行性增加了筹码。

1 实际隧道的通风效果分析

1.1 瓮福磷矿穿岩洞隧道概况

瓮福磷矿穿岩洞隧道是一座双向单洞隧道,隧道入口处于蚂蚁坟地段,坐标为 $X:87\ 668.514\ \text{m}$, $Y:39\ 795.449\ \text{m}$, $Z:1\ 364.24\ \text{m}$;出口处为原厂地段,坐标为 $X:88\ 394.867\ \text{m}$, $Y:39\ 232.036\ \text{m}$, $Z:1\ 327.48\ \text{m}$ 。隧道全长近 919.8 m,纵坡 4.0%,隧道路面横坡定为 2%。该隧道区域属中山地区,山间沟谷地貌,总体地势东高西低。隧道所经地段主要为中山山脊地带,海拔高程在 1 100~1 500 m 间,相对高差近 400 m。隧道出、入口段均为山脊斜坡地段,地表自然坡度在 25~30 °C 左右,同时隧道围岩工程地质条件较差。

该隧道按双向二车道二级公路单洞隧道设计,隧道建筑限界按 40 km/h 行车速度确定,隧道内轮廓采用三心圆形式,单洞建筑限界净宽 9.5 m、净高 5.0 m,行车道(含路缘带)宽 8.0 m,检修道宽 0.75 m。单洞净空面积正常路拱段为 56.16 m²,带仰拱地段为 69.56 m²。同时,在左右两侧检修道及余宽下设置一个尺寸为 50 cm×50 cm 的电缆沟,路面两侧各设置直径为 20 cm 的圆形开口型排水边沟。

关于隧道通风方面,考虑到解决隧道内行车尾气排出的通风问题,瓮福穿岩洞隧道在原有的通风设计中,安装了两道射流风机进行纵向通风,即在距离隧道进、出口近 100 m 处分别在隧道顶部安装了 2 台射流风机并联通风,其中 1 台运行,1 台备用。

1.2 瓮福磷矿穿岩洞隧道存在的通风问题

考虑到隧道封闭性、狭长性、四面不可及性等特点,通过分析瓮福磷矿穿岩隧道的通风和运营状况,得到主要的通风问题如下:

1) 瓮福磷矿穿岩洞隧道是一座双向单洞隧道,其内部的风流大小和方向会随车流方向、车速、交通量的变化而变化,并且隧道内空气流动的大小和方向还受隧道内、外气候条件的影响很大,这导致了隧道内的自然风向表现出极大的不确定性,自然风不能有效排出行车产生的污浊空气。

2) 穿岩洞隧道内原安装的两道射流风机相距较远,如图1所示,射流风机接力效果减弱,加上自然风压在不同自然条件下对其产生的积极或者消极的影响,使得射流风机引射风流的作用大大削弱。当射流风机运行时,隧道进、出口附近的通风效果较好,但在中部易出现污风停滞,污浊空气难以及时排出隧道,导致汽车运行的可见度降低,增加行车危险度;当射流风机停止运行时,隧道内行车产生的污浊空气主要靠自然通风排出,由于自然风压的不稳定,因而隧道内的污浊空气紊乱,且难以及时排出。

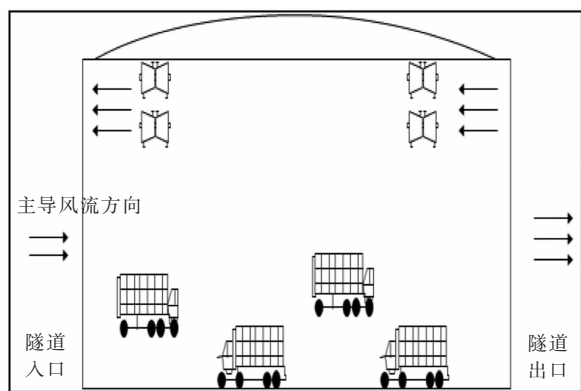


图1 原射流风机现有安装示意

Fig. 1 Existing installation diagram of original jet fan

3) 在两处各安装2台射流风机,其中1台运行,1台备用,不仅射流风机数量偏少,而且排风的接替能力偏弱。

4) 由于隧道全长约920 m,隧道内双向行车速度慢,通风相互影响,易导致风流紊乱,汽车排放尾气难以排出,尤其是在通车量较大的情况下,隧道内空气质量差,且行车能见度较低,如图2所示,不仅影响了行车安全和行车效率,而且严重危害到汽车司机和行人的身体健康。



图2 隧道通风现状

Fig. 2 Tunnel ventilation status map

规范》相关部分的说明,计算CO、烟雾和异味进行稀释所需的3种需风量中的最大值为隧道通风的最终需风量标准。并且隧道通风标准要求如下:

1) 双向交通的隧道设计风速不应大于8 m/s;单向隧道设计风机不应大于10 m/s,特殊情况可取12 m/s;人车混合隧道风速小于7 m/s。

2) 人车混合隧道长度小于1 000 m,同时CO设计浓度为 150×10^{-6} 。

3) 采用钠灯光源时,行车速度在40 km/h时,烟雾设计浓度: 0.009 m^{-1} ,浓度大于 0.012 m^{-1} 时,采取交通管制。

4) 在隧道进行纵向通风换气时,隧道内换气风速不应低于2.5 m/s。

2.2 瓮福磷矿穿岩洞隧道需风量计算

依据设计资料可知,穿岩洞隧道的设计行车速度为40 km/h,则隧道全长稀释CO的需风量可根据式(1)和式(2)进行计算,而烟雾和异味进行稀释所需的需风量可根据式(3)、式(4)和式(5)进行计算:

$$Q_{co} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{co} \cdot f_a \cdot f_d \cdot f_h \cdot f_w \cdot L \cdot \sum_{m=1}^n (N_m \cdot f_m) = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \times 0.01 \times 1.0 \times 1.5 \times 1.6 \times 1.0 \times 920 \times (500 \times 5 + 500 \times 1.0) = 0.0184 (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1)$$

式(1)中: Q_{co} 为隧道全长CO排放量, m^3/s ; q_{co} 为CO基准排放量, $\text{m}^3/(\text{辆} \cdot \text{km})$; f_a 为考虑CO的车况系数; f_d 为车密度系数; f_h 为考虑CO的海拔高度系数; f_m 为考虑CO的车型系数; f_w 为考虑CO的纵坡-车速系数; n 为车型类别数; L 为隧道长度,m; N_m 为相应车型的设计交通量,辆/h。

$$Q_{\text{req(CO)}} = \frac{Q_{co}}{\delta} \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{T}{T_0} \times 10^6 = \frac{0.0184}{150} \times 1 \times 303 / 273 \times 10^6 = 136.15 (\text{m}^3/\text{s}) \quad (2)$$

式(2)中: $Q_{\text{req(CO)}}$ 为隧道全长稀释CO需风量, m^3/s ; δ

2 实际隧道的需风量计算

2.1 公路隧道通风卫生标准

根据JTGTD70.02.2014《公路隧道通风照明设计

为 CO 设计浓度, 10^{-6} ; P_0 为标准大气压, kN/m^2 ; P 为隧道设计气压, kN/m^2 ; T_0 为标准气温, K ; T 为隧道夏季的设计温度, K 。

$$Q_{VI} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{VI} \cdot f_{a(VI)} \cdot f_d \cdot f_{h(VI)} \cdot f_{iv(VI)} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^n (N_m \cdot f_{m(VI)}) =$$
$$\frac{1}{3.6 \times 10^6} \times 2.5 \times 1 \times 1.5 \times 1.25 \times 0.958 \times 920 \times (500 \times 1.5 + 500 \times 0.4) =$$
$$1.09 (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3)$$

式(3)中: Q_{VI} 为隧道全长烟雾排放量, m^3/s ; q_{VI} 为烟雾基准排放量, $\text{m}^3/(\text{辆} \cdot \text{km})$; $f_{a(VI)}$ 为考虑 CO 的车况系数; $f_{h(VI)}$ 为考虑 CO 的海拔高度系数; $f_{m(VI)}$ 为考虑 CO 的车型系数; $f_{iv(VI)}$ 为考虑 CO 的纵坡-车速系数; n 为车型类别数。

$$Q_{\text{req}(VI)} = \frac{Q_{VI}}{K} =$$
$$1.09/0.009 = 121.11 (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4)$$

式(4)中: $Q_{\text{req}(VI)}$ 为隧道全长稀释烟雾的需风量, m^3/s ; K 为烟雾设计浓度, m^{-1} 。

$$Q_{\text{req}(\text{火})} = A_r \times v_r \quad (5)$$

式(5)中: $Q_{\text{req}(\text{火})}$ 为隧道全长稀释异味的需风量, m^3/s ; v_r 为隧道中的平均风速, m/s ; A_r 为隧道净空断面积, m^2 。

根据上述隧道通风卫生标准和隧道换气最低风速要求, 得到瓮福磷矿穿岩洞隧道的较优平均风速的范围为 (2.5~8 m/s), 代入式子(5)中得到全长异味所需要的需风量范围为 140.4~449.28 m^3/s , 对比 CO、烟雾和异味 3 种需风量, 得到当隧道需风量在 140.4 ~ 449.28 m^3/s 范围内时, 瓮福磷矿穿岩洞隧道的通风要求达到隧道通风卫生标准。

2.3 瓮福磷矿穿岩洞隧道初始风速确定

为了确定在非风机状态下隧道中的风速, 运用 ZRQF-D 系列智能式风速仪^[17], 采用侧身测量法来对隧道内的风速进行测定, 测点主要布置在隧道两侧的进风口 100 m 处、出风口 100 m 处及隧道中部, 共计 6 个测点, 测点布置示意如图 3 所示, 测点 1、测点 2、测点 3 的行车方向是测点 1→测点 3, 测点 4、测点 5、测点 6 行车方向是测点 4→测点 6。测量结果见表 1。

对表 1 中瓮福磷矿穿岩洞隧道现场调查的各项数据进行归类 and 计算, 得到在无风机的状态下, 隧道内自然风向多为东北风, 风速多在 0.3~0.6 m/s 之间变化, 考虑到更好地进行 2 种风机组合的模拟对比, 将隧道在无风机状态下风速确定为 0.5 m/s。

通过上述瓮福磷矿穿岩洞隧道通风问题的分析, 了解到原有隧道通风系统在隧道中的产风量严重不足, 达不到隧道通风设计卫生标准, 为了更好地改

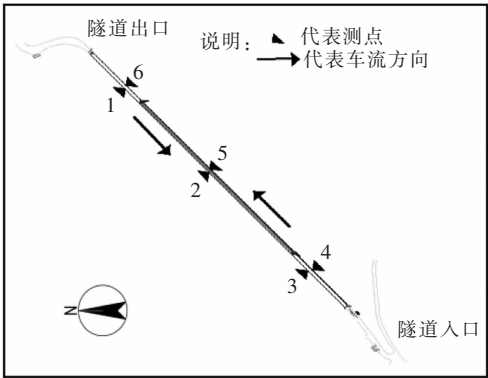


图 3 测点布置示意

Fig. 3 Schematic diagram of measuring point arrangement

表 1 各测点风速、风量测定统计表

Table 1 Statistics table of wind speed and wind volume at each measurement point

测点号	测定时间	实际平均风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	标态风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	风向
1	9:30~11:30	0.38	20.01	正向
2		0.45	23.92	正向
3		0.47	25.12	反向
4		0.71	38.05	正向
5		1.22	65.51	正向
6		1.61	86.76	正向
1	12:30~13:30	0.98	53.06	反向
2		0.33	17.70	反向
3		0.58	31.07	反向
4		0.47	25.26	反向
5		0.41	22.05	正向
6		0.53	28.45	正向
1	14:00~15:30	0.45	24.05	反向
2		0.48	25.69	反向
3		0.45	23.91	反向
4		0.37	19.56	反向
5		0.66	35.47	反向
6		0.33	17.90	反向

注: 1.测点位置: 隧道入口 100 m 处、隧道出口 100 m 处、隧道中间的两侧各一个测点;
2.隧道入口: 蚂蚁坟, 标高: 1364.24 m;
3.隧道出口: 穿岩洞矿区, 标高: 1327.48 m;
4.风向: 规定隧道入口至隧道出口风向为正向, 隧道出口至隧道入口方向为反向。

善隧道现有的通风状况,同时探究空气幕替代射流风机加强隧道通风的可行性,根据计算得到的瓮福磷矿穿岩洞隧道通风卫生标准需风量的范围(140.4~449.28 m³/s)和平均速度的范围(2.5~8 m/s),提出了 2 种新的风机组合优化方式。一种是在原有的射流风机中添加风机台数,即风机组合达到 3 组两两并联总数达到 6 台,另一种是以空气幕的引射功能为主的 3 组两两并联空气幕的组合方式。

3 计算模型建立及边界条件设定

3.1 模型建立及网格划分

根据瓮福磷矿穿岩洞隧道实际长度,确定模型隧道总长度为 920 m,高度为 $H_6=5$ m,宽度为 $W_6=9.5$ m,隧道断面的面积为 69.56 m²。空气幕模型洞室高 $H_3=H_4=2$ m,长度为 8 m,宽 2 m,空气幕风机直径 $D=2R_3=1.3$ m,空气幕长为 2 m,空气幕出风口与隧道成 40°。射流风机模型 $D_6=D_7=1.1$ m,风机长度 $L=2$ m,风机间的横向间距 $L_{10}=3.6$ m。应用 GEOMETRY 建立的引射风流空气幕和射流风机几何模型如图 4 所示。

运用 ICEM 对模型进行网格划分^[18],为了确保精准,在网格划分期间风机附近网格进行加密,隧道出入口网格设置较为疏松,2 种风机模型都采用结构网格,且质量都达到模拟要求,空气幕模型网格总数量为 892 264,射流风机模型网格总数量为 689 654。如图 5 所示。

3.2 边界条件设定

对隧道模型进行 FLUENT 模拟计算时,主要是以 RNG k-ε 的湍流模型为主,离散项都采用二阶迎风格式,压力速度耦合选用标准 SIMPLE。

具体边界条件设置如下:隧道进出口选用压力边界条件,根据实际通风效果评测结果表 1,得到隧道在无风机状态下的风速大概为 0.5 m/s (空气幕模型也一样)。因此,通过换算得到隧道入口边界条件设置压力为 9.5 Pa,出口与外界大气相通设置为 0 Pa。其次,风机内部压力面,设置为边界条件 FAN。风机 WALL 采用默认壁面光滑,隧道壁面粗糙度设置为 0.002 5^[19]。

射流风机压力面参数设置,射流风机是一种通过推力和流量来判断通风性能的特殊轴流风机,为了更好地进行对比,需要进行全压换算,根据轴流风机的

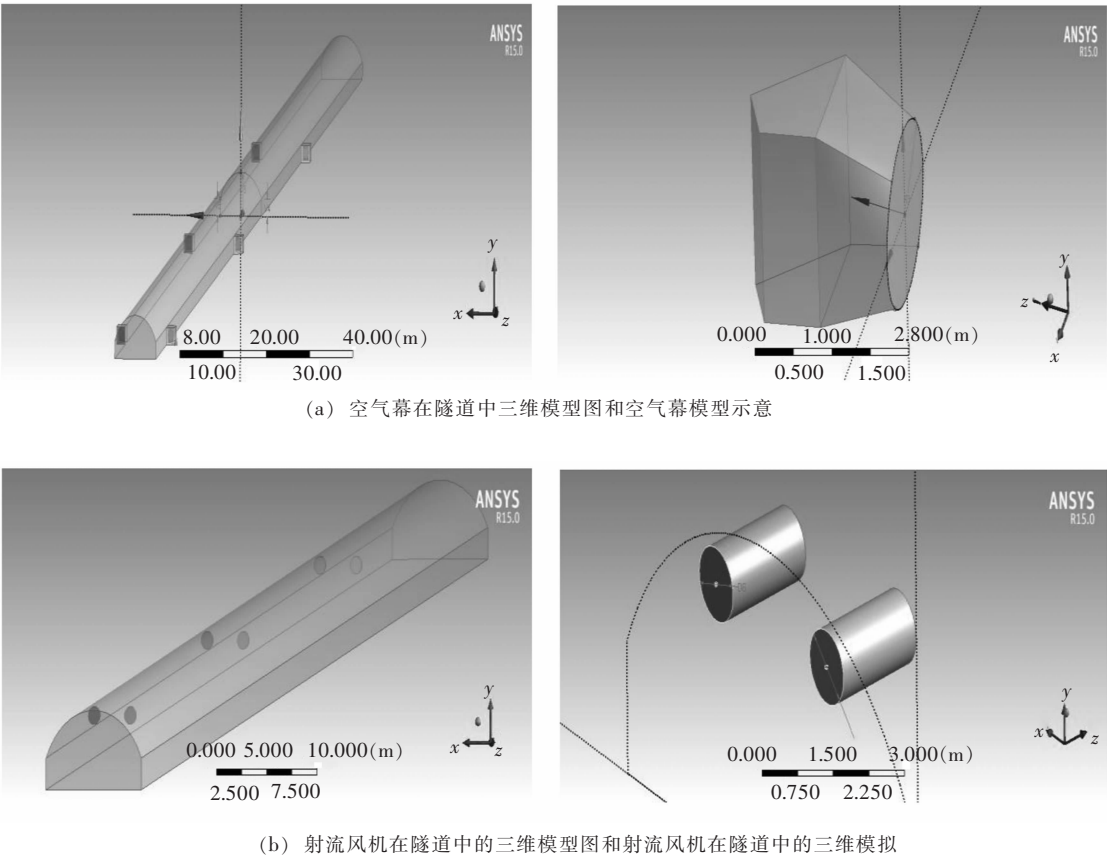
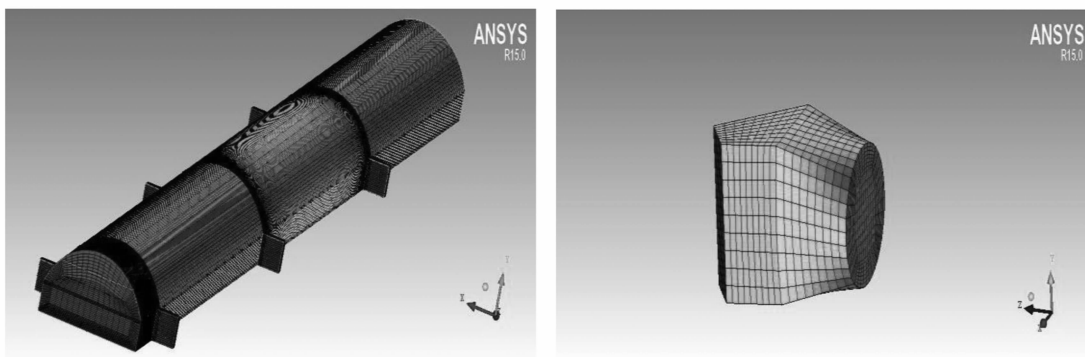
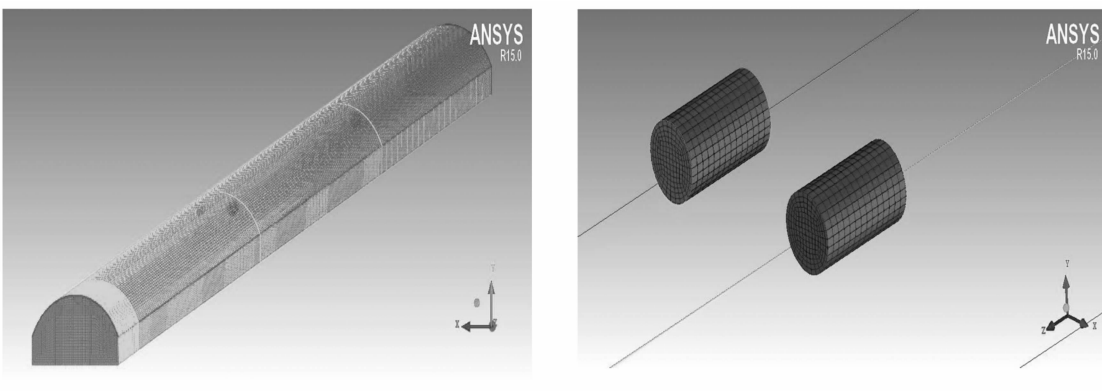


图 4 射流风机和空气幕在隧道中的几何模型

Fig. 4 Geometric model of jet fan and air curtain in tunnel



(a) 空气幕在隧道中网格划分图和空气幕模型网格



(b) 射流风机在隧道中的网格划分图和射流风机网格

图 5 射流风机和空气幕在隧道中的计算模型网格

Fig. 5 Grid diagram of calculation model of jet fan and air curtain in tunnel

全压计算公式及:

$$P=P_d+P_{st} \quad (6)$$

式(6)中: P 为全压,Pa; P_d 为动压,Pa; P_{st} 为静压,Pa。

获得射流风机 30 kW 的动压 $P_d=0.5\rho v^2=603$ Pa, $\rho=1.2$ 表示空气的密度,kg/m³。关于静压 P_{st} ,射流风机的静压主要是用来克服进口处的阻力和消声器的阻力^[20],而射流风机静压计算可以通过消声器产品的规格和轮毂比来确定,但射流风机的静压很小,很多时候静压和大气接触后就消失,相比较于以动压为主的射流风机,静压很多时候影响意义不大。因此,为了模拟计算过程的方便,简化风机设计模型的复杂性,文中以风机静压无限小为前提条件,设计射流风机模型前后无管道,风机壁面光滑,使得此时射流风机 $P=P_d$,射流风机达到最大的推力并且性能达到较优状态。

所以在模拟中可以理解为

$$P=P_d=\frac{1}{2}\rho\left(\frac{Q}{A}\right)^2 \quad (7)$$

式(7)中: P 为全压,Pa; $\rho=1.2$ 为空气的密度,kg/m³;A为射流风机的出口面积,m²。

空气幕压力面参数设置,空气幕中的风机为传

统的轴流风机,由于模拟需要,根据全压特性曲线,对 4 种功率的风机进行拟合,得到全压和风速方程式如表 2 所列,而各功率压力面所对应的压力参数就是全压风速拟合方程^[21]。

表 2 各功率的风压拟合方程

Table 2 Wind pressure fitting equation for each power

功率/kW	全压 P 和风速 v 拟合方程式	速度范围/(m·s ⁻¹)
30.0	$P_1=-0.011v_1^3+0.8159v_1^2-20.117v_1+986.90$	30~33
18.5	$P_2=-0.73v_2^2-36.29v_2+250.99$	23~25
15.0	$P_3=-0.038v_3^3+1.7v_3^2-25.49v_3+720.04$	14~16
7.5	$P_4=-0.97v_4^2-24.229v_4+335.63$	10~13

4 数值模拟计算结果与分析

4.1 总功率相同下射流风机组合和空气幕组合模拟研究

2 种风机组合的单台风机功率选用 30 kW,总功

率维持在 $K_{空}=K_{射}=180\text{ kW}$ 相同情况下进行对比,如图 6 表示单个风机功率为 30 kW 的 2 种风机组合在各自轴线高度上的隧道中线处沿隧道长度方向的速度变化曲线。图 7 表示 2 种风机组合在隧道中产生的平均风量。

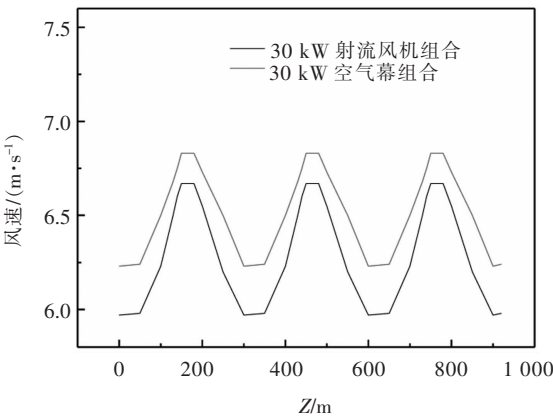


图 6 风机组合在轴线高度上的速度变化曲线
Fig. 6 The speed change curve of the wind turbine at the height of the axis

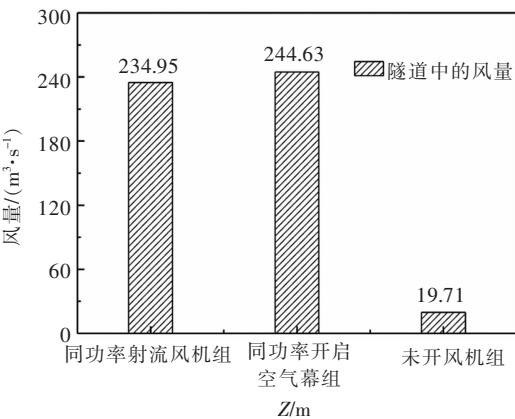


图 7 同功率风机组合隧道中的平均风量
Fig. 7 Average air volume of fan combinations of the same power in the tunnel

由图 6 可知,2 种风机组合在距离入口 50 m 处,因受风机组合的影响,速度开始不断增加,当到达 150 m 时速度达到平稳且最大,在入口 200 m 处,由于距风机口的距离变远,风速受风机影响开始减弱,风速也随着距离的增加开始减小,一直减小到距入口 300 m 的位置,此时风速保持在平均风速水平线上振动,并且保持一定距离的平稳,直到距入口 350 m 风速开始进入新一轮的相同的变化,类似的变化一直持续到末端风机组合的影响结束。此外,通过 2 种风机组合的对比,还发现空气幕风机组合的最高风速和最

低风速差约为 0.6 m/s ,而射流风机组合最大风速和最小风速差约为 0.7 m/s 。这说明 2 种风机组合速度变化状况大致相同,都是先增加后减小,从最大与最小风速差状况下看,空气幕组合风速变化较为平稳,且速度曲线整体都要高于 6.18 m/s ,而射流风机组合风速较为逊色,整体速度曲线高于 5.95 m/s 。其次,从图 7 可看出,无风机状态下隧道平均风量为 $19.71\text{ m}^3/\text{s}$,空气幕组合产生的隧道平均风量为 $244.63\text{ m}^3/\text{s}$,射流风机组合产生的平均风量为 $234.94\text{ m}^3/\text{s}$ 。综上图 6、图 7 得到,2 种风机组合对隧道空气质量都有着显著的提高,并且在同功率状态下,空气幕组合产生的风量要高于射流风机组合,因此如果把射流风机组合的模拟结果当成是一个标准,空气幕组合可以在相对于较低的总功率下完成这个通风要求,从而达到节能减排的目的。

4.2 不同总功率下的风机组合模拟研究

为了验证上述的假设,选用 7 种最为接近 180 kW 射流风机组合通风效果,且低于 180 kW 总功率的空气幕组合与 180 kW 射流风机组合进行对比,如表 3 所列, $K_1, K_2, \dots, K_6$ 表示风机型号,图 8 表示空气幕各风机功率编号平面图。

表 3 7 种风机组合的功率分配
Table 3 Power distribution of 7 fan combinations

组合 类型	功率/kW						总功率
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	
第 1 种空气幕组合 类型 P_1	30	30	30	30	30	18.5	168.5
第 2 种空气幕组合 类型 P_2	30	30	30	30	18.5	18.5	157
第 3 种空气幕组合 类型 P_3	30	30	30	18.5	18.5	18.5	145.5
第 4 种空气幕组合 类型 P_4	30	30	30	30	30	15	165
第 5 种空气幕组合 类型 P_5	30	30	30	30	15	15	150
第 6 种空气幕组合 类型 P_6	30	30	30	30	18.5	15	153.5
第 7 种空气幕组合 类型 P_7	30	30	30	18.5	18.5	15	142

图 9 表示 8 种不同功率风机组合在各自轴线高度上的隧道中线处沿隧道长度方向的速度变化曲线,图 10 表示各个功率在隧道中产生的平均风量。

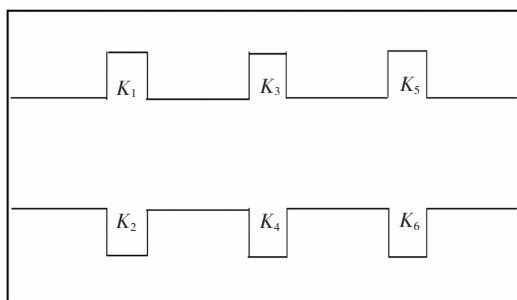


图 8 空气幕各风机功率编号平面示意

Fig. 8 Air curtain power number plan of each fan

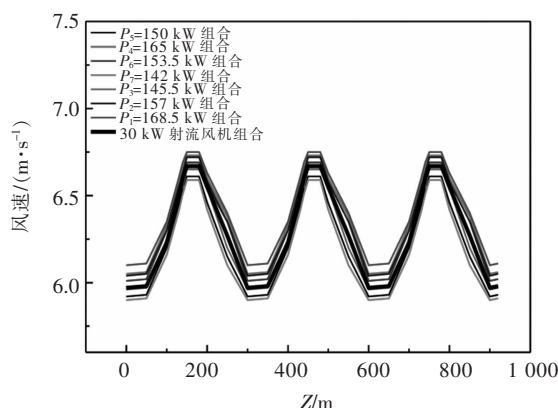


图 9 不同功率风机在轴线高度上的速度变化曲线

Fig. 9 Speed variation curve of different power fan combinations on axis height

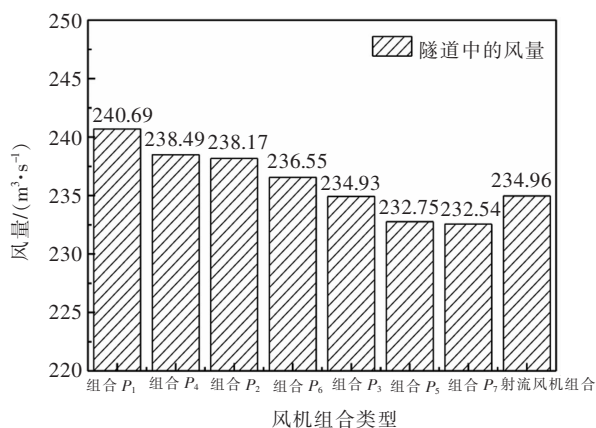


图 10 各个功率在隧道中产生的平均风量

Fig. 10 Average air volume generated by each power in the tunnel

由图 9 可知,其速度变化过程和图 6 所述一样,观察图 9 得到速度曲线中最为接近 180 kW 射流风机组合的是 P_3 和 P_6 空气幕风机功率组合,且 P_3 相对于 P_6 隧道风速比较稳定,变化的频率也与射流风机组合重合度较高。而 P_5 和 P_7 的速度曲线由于达不到射流风机组合的要求,因此不满足。至于其他功率组合,虽然速度曲线都要大于射流风机组合,但考虑最

佳的节能原则,其他几种功率组合都要逊色于 P_3 和 P_6 。除此之外,还发现 2 种较为特殊功率组合 P_3 和 P_5 ,即 P_5 的风机组合总功率明显要高于 P_3 的风机组合,但 P_3 速度曲线明显要高于 P_5 ,这说明合理的功率分配能够在减小总功率的条件下,有效地提高通风效率。从图 10 可以看出, P_3 功率组合产生风量为 $234.93 \text{ m}^3/\text{s}$ 能够节约 34.5 kW 功率, P_6 功率组合产生风量为 $236.55 \text{ m}^3/\text{s}$ 能够节约 26.5 kW 功率,虽然 2 种功率组合产生风量近似相等,但 P_3 总功率明显要小于 P_6 ,因此 P_3 功率组合的节能减排优于 P_6 功率组合。综上所述,除了 P_7 和 P_5 两种风机功率组合,其他风机组合速度曲线都能够高于或者近似等于总功率 $P=180 \text{ kW}$ 射流风机组合的风量和风速要求,而在这些风机组合中 $P_3=145.5 \text{ kW}$ 功率组合是满足要求前提下,总功率最低的风机组合。

4.3 总功率相同下不同风机组合的模拟研究

为了进一步进行功率组合的优化,选用上述所提到的 P_5 和 P_3 功率组合进行研究。由上可知,合理的功率分配能够在减小总功率的条件下,有效地提高通风效率,因此 2 种功率组合在确定自身总功率不变的情况下,分别选 3 种不同的功率分配方式进行对比,如表 4 和表 5 所示。

表 4 P_3 功率下 3 种不同风机功率风机组合的分配Table 4 Allocation of three different fan power fan combinations at P_3 power

组合类型	功率/kW						总功率
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	
第 1 种 P_3 总功率风机组合	30	30	30	18.5	18.5	18.5	145.5
第 2 种 P_3 总功率风机组合	30	18.5	30	18.5	30.0	18.5	145.5
第 3 种 P_3 总功率风机组合	30	30	30	30	18.5	7.5	146.0

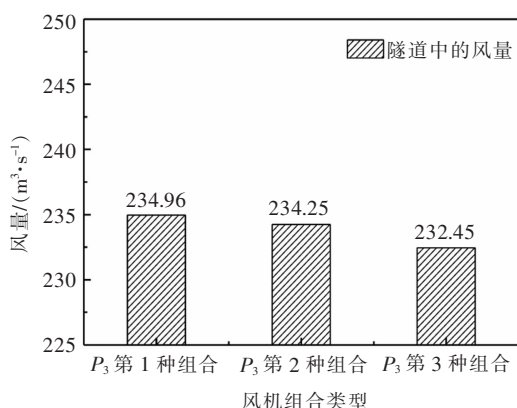
表 5 P_5 功率下 3 种不同风机功率风机组合的分配Table 5 Allocation of three different fan power fan combinations at P_5 power

组合类型	功率/kW						总功率
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	
第 1 种 P_5 总功率风机组合	30	30	30	15	15	15	150
第 2 种 P_5 总功率风机组合	30	30	30	15	30	15	150
第 3 种 P_5 总功率风机组合	30	30	30	30	30	0	150

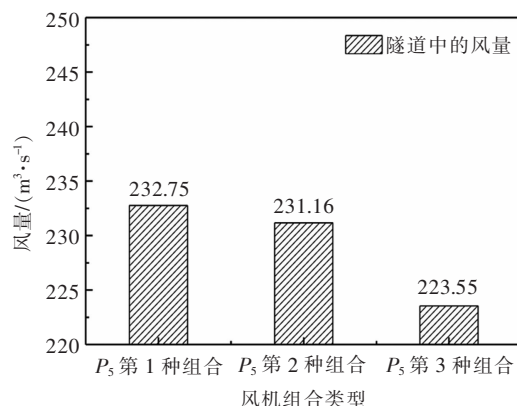
观察表 4 和表 5 得到, P_3 条件下的第 3 种风机组合,由于单个风机功率局限,分配总功率无法达到

145.5 kW,所以做了一些相应的调整,改变了单风机功率,使得总功率达到 146 kW,且满足误差允许范围,让第 3 种风机组合总功率近似和其他两种一样。而 P_5 条件下的第 3 种风机组合通过直接选择关闭 K_6 风机,来达到满足总功率 150 kW 的目的。

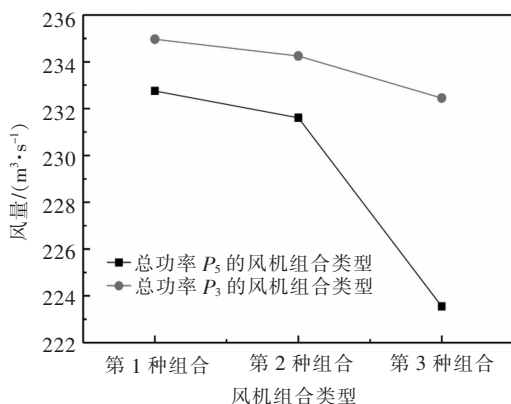
图 11(a)和图 11(b)表示的是总功率 $P_3=145.5$ kW 和总功率 $P_5=150$ kW 3 种风机功率组合在隧道中产



(a) 总功率 P_3 三种风机组合隧道产生风量



(b) 总功率 P_5 三种风机组合隧道产生风量



(c) 总功率 P_5 和 P_3 三种风机组合隧道产生风量对比

图 11 P_5 和 P_3 不同功率组合隧道中的风量变化

Fig. 11 Changes in air volume in tunnels with different power fan combinations of P_5 and P_3

生的风量。由图 11 可知,在 P_3 和 P_5 的总功率条件下,第 1 种风机组合是通过让同功率风机并联的形式组合而成,隧道风量产生分别为 $P_{31}=234.96$ m³/s, $P_{51}=232.75$ m³/s。而第 2 组风机组合主要是单台同功率风机串联的组合形式,其中产生的隧道风量为 $P_{32}=231.61$ m³/s, $P_{53}=234.25$ m³/s。第 3 组风机组合是通过降低风机组合中固定的 1 台或者是 2 台风机功率来满足 P_3 和 P_5 总功率要求的风机组合形式,产生的隧道风量为 $P_{53}=223.56$ m³/s, $P_{33}=232.45$ m³/s。这说明总功率相同,同功率风机两两并联的风机组合产生的风量较多,采用这样的方法,能够一定程度的节约总功率消耗。图 11(c)为 P_5 和 P_3 3 种组合隧道中产生风量进行对比,由图 11 可知,风量曲线为两条递减的线段。这表明 P_5 和 P_3 在进行的 3 种同功率下不同风机功率组合分配时,第一种的风机组合形式较为优秀,接着是第 2 组,最后是第 3 组。与此同时,还观察到曲线前半部分第 1 组到第 2 组的线段斜率较为平滑,这表示 2 组风量差距不大, P_3 的第 1、第 2 组风机组合,风量差为 0.71 m³/s, P_5 的第 1、第 2 组的风量差为 1.14 m³/s。而两线段后半部分第 2 组到第 3 组风机组合的曲线的斜率观察相对较大,并且 P_3 第 2 组到第 3 组线段的斜率比 P_5 的更低。这说明通过单一风机功率减小虽然可以达到总功率降低的目的,但严重的影响风机组合的通风效率。综上分析可知,同功率风机并联的组合形式,即 P_3 和 P_5 的第 1 种风机组合为该功率条件下较优的组合分配方式,此外总功率在进行分配时,让较多的风机参与功率的分配,这样不仅能够有效的降低功耗,而且还能极大地提高通风效率。

5 结 论

1)射流风机组合和空气幕风机组合在同个位置以 6 台 30 kW 风机两两并联进行模拟,且 2 种组合都能够达到瓮福磷矿穿岩洞隧道所需的通风卫生标准:需风量的范围(140.4~449.28 m³/s)和平均风速范围(2.5~8 m/s)。同时还发现空气幕组合通风效果要优于射流风机的组合,空气幕组合隧道中风量为 244.63 m³/s,射流风机组合隧道中的 234.96 m³/s,两者相差了 9.67 m³/s。

2)空气幕组合可以在总功率较低情况下替代射流风机组合,通过列举 7 种最为接近 180 kW 射流风机组合通风效果,且低于 180 kW 总功率的空气幕组合,对比在隧道中运行时产生的风量和风速,得到表 3 中

的 $P_3=145.5$ kW 组合较优, P_3 组合在近似满足总功率 180 kW 的射流风机风量要求的情况下, 功率节约可达到 34.5 kW。

3) 对较优空气幕组合 P_3 进行组合中风机分配优化, 得到在总功率相同的空气幕组合分配条件下, 同功率的风机两两并联的设置形式通风效果较优。另外, 在功率分配时, 应该尽量让较多的风机参与分配, 这样可以有效地降低总功率, 并且提高风机通风的效率。

参考文献:

- [1] 吴秉礼. 隧道射流风机的设计与选型[J]. 风机技术, 2001(4):14-15.
- [2] 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.
- [3] 崔德振, 邢金城, 凌继红, 等. 城市道路隧道通风井形式对通风效果的影响[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(6):136-141.
- [4] 李晓菲, 孙三祥, 吴林庄, 等. 公路隧道射流通风系统风机纵向间距分析[J]. 制冷与空调, 2016, 16(3):26-29.
- [5] 邢利英, 高孟理. 隧道射流通风效率的实验研究[J]. 现代隧道技术, 2008(3):50-53.
- [6] 周家才, 熊雅, 王建宇, 等. 西秦岭隧道互补式通风数值仿真分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34(7):59-63.
- [7] JOON H, KIM. High efficiency design of a tunnel ventilation jet fan through numerical optimization techniques [J]. Mechanical Science and Technology, 2012(6):1793-1800.
- [8] WANG F, WANG M G, HE S, et al. Computational study of effects of jet fans on the ventilation of a highway curved tunnel [J]. Tunn Undergr Space Technol, 2010(25):382-390.
- [9] 吴珂, 方飞龙, 朱凯, 等. 基于 FLUENT 的隧道射流风机最佳安装倾斜角研究[J]. 风机技术, 2014, 56(6):17-21.
- [10] 任锐, 谢永利. 海底沉管隧道射流风机通风效果影响因素的研究[J]. 流体机械, 2016, 44(2):43-47.
- [11] 解彬. 机械化矿山空气幕应用与研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2017.
- [12] 王海宁, 程哲. 空气幕研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(3):40-46.
- [13] 张水平, 黄亮亮, 张驰, 等. 矿井扩能通风系统计算机优化研究[J]. 有色金属科学与工程, 2015, 6(2):99-103.
- [14] 王海宁. 硐室型矿井风流调控技术[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(5):126-131.
- [15] 张昭明. 矿用空气幕特性研究及优化设计[D]. 赣州: 江西理工大学, 2013.
- [16] 李海燕, 王毅. 直流低速风洞收缩段的数值模拟研究[J]. 计测技术, 2012, 32(1):19-21.
- [17] 王海宁, 黄紫彬. 金属矿山通风系统鉴定方法研究[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(2):48-51.
- [18] 纪兵兵, 陈金瓶. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M]. 中国水利水电出版社, 2012.
- [19] 王亚琼, 武义凯, 辛温潇, 等. 隧道壁面粗糙度对摩阻损失的影响分析[J]. 公路, 2015, 60(9):289-293.
- [20] 田瑞祥. 射流通风 PIV 实验与数值模拟研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
- [21] 衣光臻, 袁建军, 王兆. Matlab 在汽车转向盘角脉冲输入试验数据处理上的应用[J]. 北京汽车, 2013(3):27-30.