

DOI:10.11918/201901164

吹吸式地铁轨间区域清扫流场的数值分析

张鸣凤¹, 章易程¹, 张方圆², 吴强运¹, 刘晓静¹, 郭员畅¹, 刘 凡¹

(1.中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075; 2.长沙理工大学 能源与动力工程学院, 长沙 410114)

摘 要:为提高清扫车的清扫效率,采用计算流体力学方法对吹吸式清扫流场进行计算,结合气固两相流模型分析结构参数对清扫效果的影响规律,并采取基于权矩阵分析的多目标正交试验方法,进行位置参数的优化。研究结果表明:吹嘴宽度在不大于吸嘴宽度的 0.93 倍之内增大有利于提高清扫效率;吹嘴高度不小于吸嘴高度的 0.92 倍时,增大吹嘴高度可提高清扫效率,但降低了近地面平均速度和吹嘴出口速度,不利于尘粒的起动;吸嘴倾角为 20°、吹嘴倾角为 20°、吹嘴和吸嘴之间的距离为 700 mm、吹吸嘴离地高度为 20 mm 时,吹吸式清扫方式的清扫性能最优;吹吸式清扫流场的近地面气流速度大,气流从吹嘴向吸嘴方向运动且紧贴地面,不存在气流外泄造成的二次污染。吸嘴倾角和吹嘴倾角对吹吸式清扫流场的清扫性能影响最大,其次是吹嘴和吸嘴之间的距离,吹吸嘴距离地高度对清扫性能的影响最小。

关键词:吹吸式清扫;轨间区域;计算流体力学;气固两相流;正交试验;权矩阵分析法

中图分类号: U216.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)09-0137-07

Numerical analysis on blowing-suction cleaning flow field between subway rails

ZHANG Mingfeng¹, ZHANG Yicheng¹, ZHANG Fangyuan², WU Qiangyun¹, LIU Xiaojing¹, GUO Yuanchang¹, LIU Fan¹

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To improve the dust collection efficiency of sweepers, the computational fluid dynamics method was applied to simulate the blowing-suction cleaning flow field. Influence of structural parameters on cleaning effect was analyzed combined with the gas-solid two-phase flow model. The multi-objective orthogonal test method based on weight matrix analysis was used to optimize the position parameters. Results show that when the width of the blow mouth was less than 0.93 of the width of the suction mouth, it is beneficial for improving cleaning efficiency with the increase of the width of the blow mouth. When the height of the blow mouth was more than 0.92 of the height of the suction mouth, the cleaning efficiency was improved with the increase of the height of the blow mouth, but the mean velocity near the ground and the outlet velocity of the blow mouth were reduced, which was not conducive to blowing up the dust. When the inclination of the blow mouth was 20°, the inclination of the suction mouth was 20°, the distance between the blow mouth and the suction mouth was 700 mm, and the height from the two mouths to the ground was 20 mm, the cleaning performance of the blowing-suction cleaning method was optimal. The airflow velocity was high near the ground in the blowing-suction cleaning flow field, where the airflow moved from the blow mouth to the suction mouth and the direction was close to the ground. There was no secondary pollution caused by the leakage of the airflow. The inclination of the blow mouth and the inclination of the suction mouth had the greatest influence on the cleaning performance, followed by the distance between the blow mouth and the suction mouth, and the height from the two mouths to the ground had the least effect.

Keywords: blowing-suction cleaning; area between rails; computational fluid dynamics; gas-solid two-phase flow; orthogonal test; weight matrix method

城市地铁运营里程的不断增加使得清扫地铁运营环境成为文明城市建设的必然要求,而清扫车是目前地铁隧道清扫的主要设备。清扫方式对清扫车的清扫效果有着直接影响。文献[1-3]研究了吸嘴

的结构参数对吸尘性能的影响;文献[4]提出一种由扁形喷嘴倾斜吹风和较宽吸嘴吸风构造的新型清扫装置,并通过试验证明射流角度为 60°时清扫效果最好;文献[5-6]运用气固两相流模型对中间吸风、两侧吹风的吹吸装置进行结构分析并提出改进;文献[7]分析了 L 型反吹式吸嘴的结构参数对吸尘效果的影响规律;文献[8]通过数值模拟提出 V 形反吹式吸嘴的清扫性能优于传统反吹式吸嘴。上述研究中,采用单一吸嘴吸尘进行清扫的方式,难以满

收稿日期: 2019-01-23

基金项目: 2018 年创新创业师生共创项目(2018gczd025)

作者简介: 张鸣凤(1993—),女,硕士研究生;

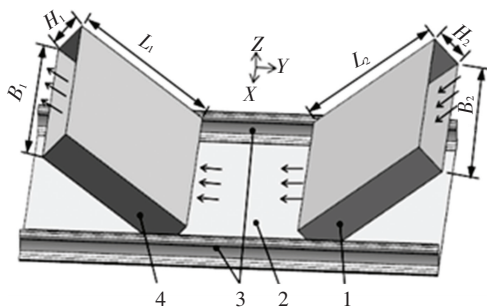
章易程(1965—),男,副教授,硕士生导师

通信作者: 章易程, yczhang@csu.edu.cn

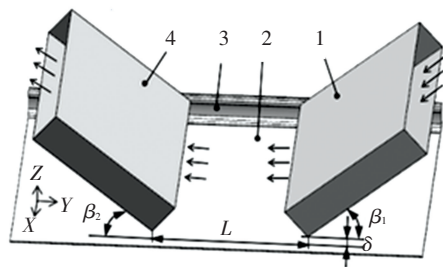
足地铁清扫效率的要求;采用吹吸式进行清扫的方式只单一研究了吹嘴结构或者吸嘴结构对清扫效果的影响,没有考虑吹嘴和吸嘴的参数组合对清扫性能的影响.以上两种清扫方式均未考虑轨道对清扫车清扫效果的影响.因此,本文提出一种新的吹吸式清扫方式,此方式主要针对地铁轨间区域,采用气固两相模拟对吹吸式清扫方式进行参数分析,研究其结构参数对吸尘性能的影响,并利用正交试验的权矩阵分析法研究其位置参数对清扫效果的影响规律.

1 物理模型

图 1 为吹吸式地铁轨间区域清扫方式的结构示意图.吹、吸组合式清扫方式由吹嘴 1 和吸嘴 4 分别承担吹、吸工作;从吹嘴 1 产生的高速气流喷向两根轨道间的地面(即轨间区域),将尘粒等垃圾吹起,再由吸嘴 4 提供的负压将垃圾随空气吸入吸尘管道,最终送入集尘箱内,从而达到清洁轨间区域的目的.其中 L_1 、 L_2 分别为吸嘴和吹嘴的长度, B_1 、 B_2 分别为吸嘴和吹嘴的宽度, H_1 、 H_2 分别为吸嘴和吹嘴的高度, β_1 、 β_2 分别为吹嘴和吸嘴与地面的倾角, L 为吹嘴与吸嘴之间的距离, δ 为吹、吸嘴距地面的高度.



(a) 结构参数



(b) 位置参数

1—吹嘴; 2—地面; 3—轨道; 4—吸嘴

图 1 结构示意图

Fig.1 Structure diagram

2 数值计算

2.1 前置处理

在吹吸组合式清扫方式中,本文将吹嘴和吸嘴工作时离地面间隙设为 10 mm^[9].为了更好地模拟

吹嘴和吸嘴的工作过程,通常在其 workflow 周围添加适当扩展区来保证气流的充分发展,使气流的流动更加接近实际情况^[9].

吹吸式清扫模型前后对称,故为了节省计算量和计算时间,取其一半模型进行分析,其计算网格模型如图 2 所示.吹吸式清扫仿真模型中轨道结构属于不规则结构,因此利用 Fluent 软件将整体模型划分为非结构化四面体网格.为了精确仿真结果,采用有限体积法进行方程的离散,选择 SIMPLE 求解算法和二阶迎风差分格式.吹嘴入口采用质量流量入口,设为 4.6 kg/s;吸嘴出口采用压强出口,设相对压强为 -2 300 Pa;与大气连通的扩展区表面为压力入口,设为标准大气压强.为了模拟吹嘴和吸嘴工作,吹、吸嘴的壁面设为移动壁面,速度为 10 km/h,其余壁面均设为无滑移壁面.



图 2 计算网格模型

Fig.2 Calculated mesh model

由于清扫流场内部是气固两相混合流,计算时采用欧拉-拉格朗日模型进行离散相的求解.射流源设为面射流源,吹嘴和吸嘴底部扩展区域的前端面设为入射面,颗粒材料设为铁屑,类型选用惯性颗粒.为简化模型,铁屑采用均匀分布模式,设其直径为 3 mm,质量流量为 0.5 kg/s.

2.2 流场动力学方程

1) 连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0. \quad (1)$$

式中: $\mathbf{V}$ 为流体的速度矢量, ρ 为流体密度, t 为时间.

2) 动量方程:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = \rho \mathbf{f} - \nabla p' + \nabla \cdot (\mu_e \nabla \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\mu_e (\nabla \mathbf{V})^T). \quad (2)$$

式中:校正压力 $p' = p + ((2/3)\mu - \xi) \nabla \mathbf{V}$, 等效粘性系数 $\mu_e = \mu + \mu_T$, 湍流粘性系数 $\mu_T = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$, $\mathbf{f}$ 为体积力, p 为静压力, μ 为层流粘性系数, ξ 为体积粘性系数, k 为湍流动能, ε 为动能耗散系数, $C_\mu = 0.09$ ^[10].

3) Realizable $k-\varepsilon$ 方程.由于该流场属于湍流^[11],且 $k-\varepsilon$ 方程能很好地预测气流速度^[12],所以其计算模型采用 Realizable $k-\varepsilon$ 方程:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} k) - \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) = G_k - \rho \varepsilon, \quad (3)$$
$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \varepsilon) - \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) =$$
$$C_1 \rho E \varepsilon - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}}. \quad (4)$$

式中: G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项, ν 为运动粘性系数, $C_1 = \max(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5})$, $\eta = \frac{Ek}{\varepsilon}$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2^{[10]}$.

4) 欧拉-拉格朗日方程:

$$m \frac{dv}{dt} = F_d + G + F_s. \quad (5)$$

式中: m 为尘粒质量, v 为尘粒速度, F_d 为粘性力, G 为重力, F_s 为提升力.

2.3 尘粒启动速度

尘粒的启动速度指尘粒开始滚动的最小风速. 只有在近地面的气流速度大于尘粒启动速度的前提下, 附着在地面上的尘粒才能顺利启动^[13]. 文献^[14]认为在尘粒启动的过程中, 尘粒自身的重力与其迎面阻力平衡, 得出直径 0.08 mm 以上的尘粒的启动速度 μ_s 计算公式为

$$\mu_s = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d}. \quad (6)$$

式中: A 为经验系数, ρ_s 为尘粒密度, d 为尘粒直径. 根据式 (6) 和文献^[15]中的实验, 直径小于 3 mm 的铁屑, 其最大启动速度为 20 m/s.

3 影响参数分析

吹嘴吹出的气流速度直接影响尘粒能否顺利启动. 由尘粒启动理论可知^[16], 只有近地面气流速度大于尘粒启动速度时, 尘粒才能被顺利地吸走. 此外, 吸嘴出口速度也会影响尘粒是否能顺利进入集尘箱^[9]. 同时, 清扫效率是评价清扫车清扫性能的重要指标, 故通过计算吸嘴出口处的颗粒溢出数量和颗粒注入总量的比值对吹吸式清扫方式的吸尘性能进行合理的评价. 因此, 本文以吹嘴吹口速度、近地面平均速度、吸嘴入口压强、吸嘴出口平均速度和清扫效率作为指标判断各结构参数变化对仿真结果的影响. 由于铁屑直径一般不大于 3 mm^[5], 所以选取该高度处吹嘴和吸嘴之间的长方形区域作为近地面指标的分析区域.

因吹嘴入口和吸嘴出口部分还要连接吹风管道和吸尘管道, 故暂时不考虑吸嘴与吹嘴的长度 L_1 、 L_2 . 中国地铁线路采用 1 435 mm 的标准轨距. 综合

考虑清扫车进行作业时, 吸嘴的灵活性和边角的清扫效果, 将吸嘴宽度 B_1 设定为 1 400 mm. 由于吸嘴的高度主要受地面上尘粒的形状大小影响, 根据文献^[13,17], 吸嘴的高度 H_1 设定为 130 mm.

3.1 吹嘴结构参数分析

3.1.1 吹嘴宽度

通过改变吹吸嘴宽度比 i_b (i_b 为吹嘴宽度 B_2 与吸嘴宽度 B_1 的比值) 来改变吹嘴的宽度, 其流场仿真结果如图 3、4 所示.

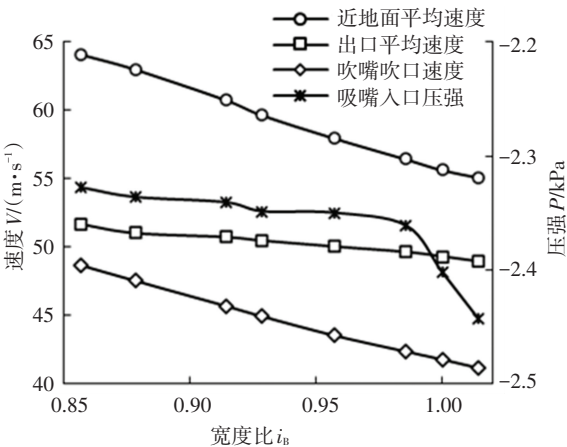


图 3 宽度对评价指标的影响

Fig.3 Influence of width on evaluation indices

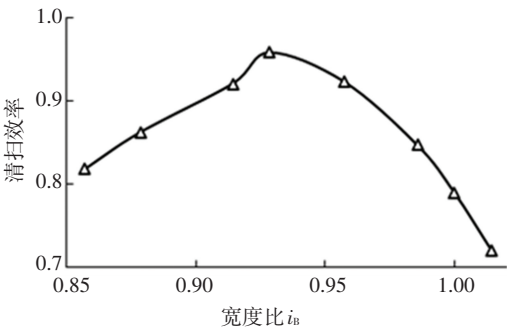


图 4 宽度对清扫效率的影响

Fig.4 Influence of width on cleaning efficiency

由上图可知, 随着宽度比的增加, 吹嘴吹口速度、近地面平均速度、吸嘴入口压强和出口平均速度不断减小, 清扫效率先增加后减小.

产生上述现象的原因: 吹嘴入口流量一定, 随着宽度比增加, 吹嘴横截面积增大, 使得吹嘴吹口速度减小, 近地面平均速度减小. 宽度比的增加, 使得流场与大气的连通度减小, 宽度比小于 0.98 时, 吸嘴入口处的负压受吹嘴吹口速度影响较小, 因此吸嘴入口压强缓慢下降, 吸尘能力增加, 使得清扫效率逐渐提高; 宽度比大于 0.98 时, 吸嘴入口处的负压受吹嘴吹口速度影响开始逐渐增大, 吸嘴入口压强急剧下降. 吹嘴横截面积的增加使得吹风面积增大, 逃逸的颗粒数量增多, 清扫效率下降. 吸嘴入口处的负压作用降低, 使得出口平均速度减小.

3.1.2 吹嘴高度

通过改变吹吸嘴高度比 i_H (i_H 为吹嘴高度 H_2 与吸嘴高度 H_1 的比值) 来改变吹嘴的高度,其流场仿真结果如图 5、6 所示。

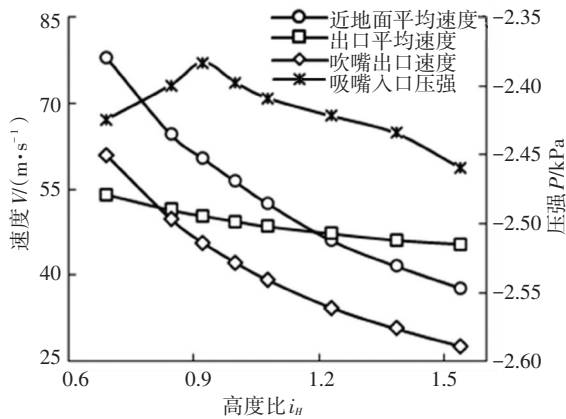


图 5 高度对评价指标的影响

Fig.5 Influence of height on evaluation indices

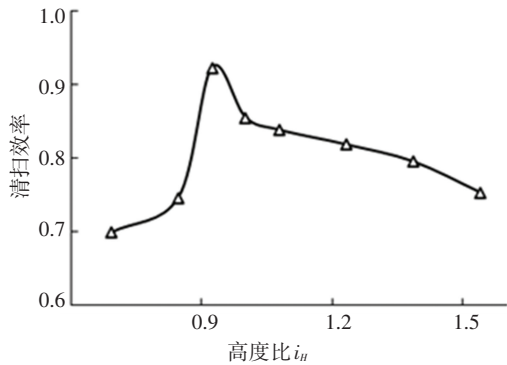


图 6 高度对清扫效率的影响

Fig.6 Influence of height on cleaning efficiency

由图 5、6 可知,随着高度比的增加,吹嘴吹口速度、近地面平均速度和出口平均速度不断减小,吸嘴入口压强和清扫效率均呈现先增大后减小的趋势。

产生上述现象的原因:吹嘴入口流量一定,随着高度比的增加,吹嘴横截面积增大,使得吹嘴吹口速度减小,近地面平均速度减小。高度比小于 0.92 时,随着高度比的增加,流场与大气的连通度减小,受大气压强的影响逐渐减小,使得吸嘴入口处的负压作用增加,因而清扫效率和吸嘴入口压强增大;高度比大于 0.92 时,吹嘴高度的增加使得吹嘴吹口远离地面的一端与吸嘴入口的距离缩短,减小了沿程损失,使得吸嘴入口压强降低。吹嘴横截面积的增加使得吹风面积增大,逃逸的颗粒数量增多,清扫效率下降。如图 7 所示,吸嘴的出口处压强为一恒定值,吹嘴高度的增加使得吹嘴的水力半径增大,流动阻力减小,能量损失较小,因此出口平均速度缓慢减小。

根据参数影响分析,吹嘴宽度 B_2 与吸嘴宽度 B_1 的比值 i_B 取为 0.93,吹嘴高度 H_2 与吸嘴高度 H_1 的比值 i_H 取为 0.92。

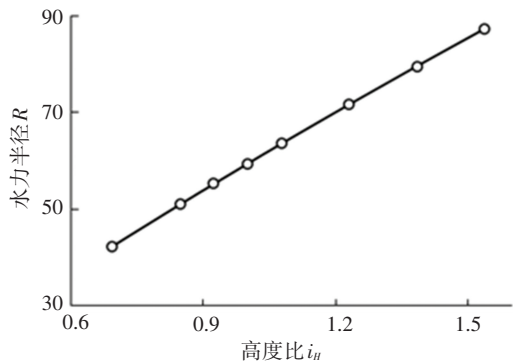


图 7 水力半径随高度比的变化曲线

Fig.7 Variation of hydraulic radius with height ratio

3.2 位置参数优化

吹吸组合式清扫方案中,吹嘴与吸嘴之间的距离 L 直接决定吸尘气流受吹风气流影响的程度,吹嘴与地面的夹角 β_1 、吸嘴与地面的夹角 β_2 以及吹、吸嘴离地高度 δ 影响吹、吸嘴之间近地面的速度以及在地面形成的风幕范围。因此,吹嘴与吸嘴之间的距离 L 、吹嘴与地面的夹角 β_1 、吸嘴与地面的夹角 β_2 以及吹、吸嘴离地高度 δ 对清扫性能有着重要的影响。为了获得上述各参数的最优化配置,借助正交试验对其进行分析。

3.2.1 试验设计方案

考虑到吹嘴倾角和吸嘴倾角的各种角度组合,吹嘴倾角和吸嘴倾角应选取相同的值;吹吸嘴离地面的高度一般控制在 20 mm 之内^[13]。因此,对吹嘴与吸嘴之间的距离 L 、吹嘴与地面的夹角 β_1 、吸嘴与地面的夹角 β_2 以及吹、吸嘴离地高度 δ 这 4 个因素,分别采用等间距的 4 个水平,选用 $L_{16}(4^5)$ 试验表,其因素与水平见表 1。

表 1 因素与水平表

Tab.1 Table of factors and levels

水平	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D
	L/mm	$\beta_1/(\text{^\circ})$	$\beta_2/(\text{^\circ})$	δ/mm
1	400	20	20	5
2	700	40	40	10
3	1 000	60	60	15
4	1 300	80	80	20

3.2.2 结果分析

为了评估吹、吸的功率,借助出进风功率比 ζ 来进行分析,其计算公式为

$$\zeta = \frac{P_o}{P_i}, \tag{7}$$

式中 P_o 、 P_i 为流出吸嘴的风功率和进入吹嘴的风功率。风功率 P' 的计算公式为

$$P' = p_s \cdot q_v, \tag{8}$$

其中 p_s 、 q_v 为静压和体积流量。

因此,选用近地面平均速度、出口平均速度、吸嘴入口压强、出进功率比和清扫效率作为试验结果的考察指标. 其中,近地面平均速度、出口平均速度、出进功率比和清扫效率在一定范围内越大越好,吸嘴入口压强在一定范围内则越小越好. 正交试验结果见表 2,表 3 为极差分析结果.

表 2 试验结果
Tab.2 Test results

实验号	水平				实验结果				
	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	近地面平均	出口平均	吸嘴入口	出进	清扫效率
					速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	压强/kPa	功率比	
1	1	1	1	1	52.13	57.11	98.75	4.98	0.91
2	1	2	2	2	62.31	50.95	98.73	1.65	0.88
3	1	3	3	3	79.45	40.49	98.88	0.51	0.87
4	1	4	4	4	110.88	19.22	99.16	0.08	0.56
5	2	1	2	3	49.83	47.21	98.86	5.28	0.68
6	2	2	1	4	59.79	49.88	98.82	2.29	0.72
7	2	3	4	1	95.24	22.05	99.37	0.15	0.64
8	2	4	3	2	146.32	51.32	98.69	0.11	0.63
9	3	1	3	4	48.90	37.13	98.99	6.06	0.70
10	3	2	4	3	59.88	16.75	99.02	0.63	0.63
11	3	3	1	2	92.25	60.06	98.69	0.59	0.87
12	3	4	2	1	123.91	57.92	98.52	0.07	0.65
13	4	1	4	2	50.48	18.38	99.14	1.90	0.63
14	4	2	3	1	61.85	41.42	98.99	1.08	0.78
15	4	3	2	4	79.07	49.12	99.03	0.76	0.77
16	4	4	1	3	97.84	57.92	99.18	0.19	0.66

表 3 极差分析结果
Tab.3 Range analysis results

考察指标	参数	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D
		L/mm	$\beta_1/(\text{^\circ})$	$\beta_2/(\text{^\circ})$	δ/mm
近地面平均速度 (m/s)	K_1	76.19	50.34	75.50	83.28
	K_2	87.80	60.96	78.78	87.84
	K_3	81.23	86.50	84.13	71.75
	K_4	72.31	119.73	79.12	74.66
	S	15.48	69.40	8.63	16.09
	优方案	A_2	B_4	C_3	D_2
出口平均速度 (m/s)	K_1	41.93	39.96	56.24	44.63
	K_2	42.62	39.75	51.30	45.18
	K_3	42.97	42.93	42.59	40.58
	K_4	41.71	46.59	19.10	38.84
	S	1.26	6.84	37.14	6.34
	优方案	A_3	B_4	C_1	D_2
吸嘴入口压强 (kPa)	K_1	98.88	98.94	98.86	98.91
	K_2	98.94	98.89	98.78	98.81
	K_3	98.80	98.98	98.89	98.98
	K_4	99.08	98.89	99.17	99.00
	S	0.28	0.11	0.39	0.19
	优方案	A_3	B_2 或 B_4	C_2	D_2
出进功率比	K_1	1.81	4.56	2.01	1.57
	K_2	1.96	1.41	1.94	1.06
	K_3	1.84	0.50	1.94	1.65
	K_4	0.97	0.11	0.69	2.30
	S	0.98	4.44	1.32	1.24
	优方案	A_2	B_1	C_1	D_4
清扫效率	K_1	0.81	0.73	0.79	0.75
	K_2	0.67	0.75	0.75	0.75
	K_3	0.71	0.79	0.75	0.71
	K_4	0.71	0.63	0.62	0.69
	S	0.14	0.16	0.18	0.07
	优方案	A_3 或 A_4	B_3	C_1	D_1 或 D_2

由表 3 可知,对近地面平均速度、出口平均速度、吸嘴入口压强、出进功率比和清扫效率,其影响因素的主次顺序分别为 BDAC、CBDA、CADB、BCDA、CBAD. 极差分析主要选取影响单个考察指标因素的最优方案,无法对多个考察指标进行综合性能的选取. 因此,本文应用权矩阵分析法,根据式(9)计算影响考察指标的各因素各水平的权重值大小^[18],并根据权重值获得综合优化方案,计算结果见表 4.

表 4 各因素水平矩阵分析

Tab.4 Matrix analysis of various factors and levels						
因素水平	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_{ave}
A_1	0.033 9	0.006 1	0.072 2	0.033 8	0.070 8	0.043 4
A_2	0.039 1	0.006 2	0.072 2	0.036 6	0.068 7	0.044 6
A_3	0.036 1	0.006 2	0.072 3	0.034 3	0.062 7	0.042 3
A_4	0.032 2	0.006 0	0.072 1	0.018 1	0.062 4	0.038 2
B_1	0.100 4	0.031 3	0.028 3	0.385 6	0.075 9	0.124 3
B_2	0.121 6	0.031 1	0.028 4	0.119 2	0.078 2	0.075 7
B_3	0.172 5	0.033 6	0.028 3	0.042 3	0.081 9	0.071 7
B_4	0.238 8	0.036 5	0.028 4	0.009 3	0.065 0	0.075 6
C_1	0.018 7	0.239 3	0.100 6	0.050 5	0.088 4	0.099 5
C_2	0.019 5	0.218 3	0.100 7	0.048 8	0.083 4	0.094 1
C_3	0.020 9	0.181 2	0.100 6	0.048 8	0.083 4	0.087 0
C_4	0.019 6	0.081 3	0.100 3	0.017 3	0.068 8	0.057 5
D_1	0.038 5	0.032 4	0.049 0	0.037 1	0.031 0	0.037 6
D_2	0.040 6	0.032 8	0.049 0	0.025 0	0.031 3	0.035 7
D_3	0.033 2	0.029 5	0.048 9	0.039 0	0.029 5	0.036 0
D_4	0.034 5	0.028 2	0.048 9	0.054 3	0.028 6	0.038 9

$$\omega = MTS. \tag{9}$$

式中： ω 为影响试验考察指标的权矩阵， M 为试验考察指标层矩阵， T 为因素层矩阵， S 为水平层矩阵。

$$M = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{lm} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{21} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & K_{2m} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & K_{l1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & K_{lm} \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} T_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_2 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & T_i \end{bmatrix},$$

$$S = [S_1 \ S_2 \ \cdots \ S_i]^T.$$

式中： l 为因素个数， m 为水平数， K_{ij} 为因素 A_i 第 j 个水平上的指标平均值（若指标越大越好，则 $K_{ij} = k_{ij}$ ；否则， $K_{ij} = 1/k_{ij}$ ）， $T_i = 1/\sum_{j=1}^m K_{ij}$ ， $S_i = s_i/\sum_{i=1}^l s_i$ ， S_i 为因素 A_i 的极差占全部因素极差总和的比， s_i 为因素 A_i 的极差。

根据计算结果，各因素对考察指标影响的主次顺序依次为 CBAD，最优方案为 $A_2B_1C_1D_4$ ，其清扫效率达 93%。

4 优化后的流场分析

4.1 速度

图 8 为吹吸式清扫方式工作时内部气体速度矢量图。从图 8 可以看出，左边吹嘴吹出的气流在轨间区域形成封闭气幕，同时在右边吸嘴负压的作用下，携尘气流被吸入吸嘴内部，将轨间区域的尘粒输送至集尘箱内。

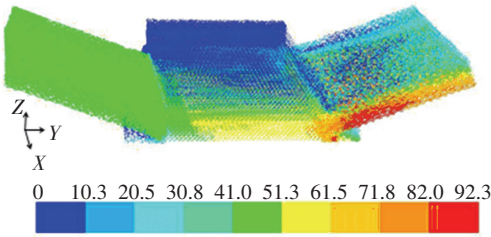


图 8 吹吸式清扫流场速度矢量图 (m/s)
Fig.8 Velocity vector in flow field of blowing and suction(m/s)

图 9 为近地面速度矢量图。其中，I 处表示的吹嘴附近速度为 30.8~41.0 m/s，II 处表示的吸嘴附近速度为 51.3.1~61.5 m/s，这些速度均大于 20 m/s，说明吸尘效果较好。

图 10 为吹吸组合式清扫方式左右对称面速度矢量图。其中，III 处表示的轨间区域近地面速度为

51.3~61.5 m/s，说明近地面气流流速高且方向紧贴地面，气流在吸嘴负压作用下进入集尘箱内，不会轻易形成二次扬尘。IV 处表示的吸嘴出口处的速度为 41.0~71.8 m/s，平均速度为 48.83 m/s，这使得尘粒等垃圾较容易进入集尘箱。

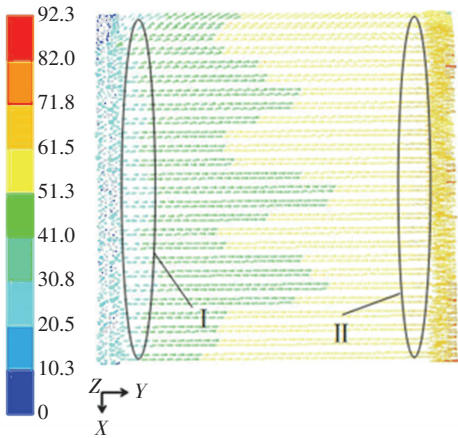


图 9 近地面速度矢量图 (m/s)
Fig.9 Vector diagram near the ground (m/s)

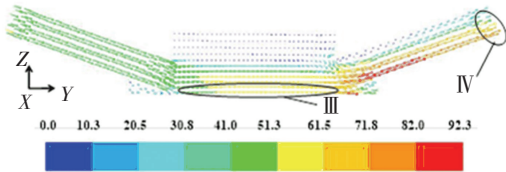


图 10 前后对称面速度矢量图 (m/s)
Fig.10 Vector diagram on anterior-posterior symmetry plane (m/s)

4.2 对称面压强

图 11 为吹吸组合式清扫方式左右对称面压强。V 处表示吸嘴入口处的平均压强为 98.88 kPa，小于标准大气压，说明吸嘴提供的负压可以使尘粒被吸嘴进入。

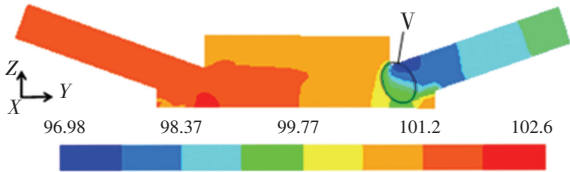


图 11 左右对称面压强 (kPa)
Fig.11 Pressure on bilateral symmetry plane (kPa)

4.3 颗粒相运动

本文以直径 3 mm 的铁屑作为研究对象，跟踪其在吹吸式清扫流场内的运动情况，结果如图 12 所示。从图 12 可以看出，除了撞击到轨道反弹出去的少数铁屑颗粒，其余铁屑颗粒基本可以顺利被吸嘴吸走。反弹出去的颗粒数与吸嘴吸走的颗粒数之比为 0.03。

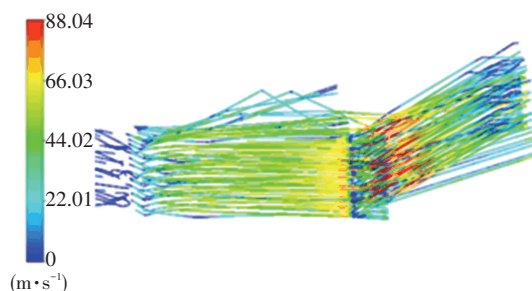


图12 铁屑的运动速度及轨迹

Fig.12 Velocity and trace of scrap iron

5 结 论

1) 吹嘴宽度不大于吸嘴宽度的 0.93 时,增大吹嘴宽度可以提高吸嘴入口处的压力真空度,增强吸尘能力,提高清扫效率。

2) 吹嘴高度不小于吸嘴高度的 0.92 时,增大吹嘴高度虽然可以提高吸嘴的吸尘能力,但降低了近地面平均速度和吹嘴出口速度,不利于尘粒的吹起。

3) 利用正交试验的权矩阵分析法,对近地面平均速度、出口平均速度、吸嘴入口压强、出进功率比和清扫效率进行综合性能的权重值计算,权重影响最大方案为(主→次):吸嘴倾角 20°、吹嘴倾角 20°、吹吸嘴之间的距离 700 mm、吹吸嘴离地高度 20 mm。

参考文献

- [1] 杨春朝,章易程,欧阳智江,等.基于流场模拟的真空清扫车吸嘴的参数设计[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(9):3704
YANG Chunzhao, ZHANG Yicheng, OUYANG Zhijiang, et al. Parametric design of dust collection port of vacuum sweeper based on flow simulation[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2012, 43(9): 3704
- [2] 欧阳智江,章易程,贾光辉,等.卷边吸嘴流场特性研究[J].机械科学与技术,2013,32(3):362
OUYANG Zhijiang, ZHANG Yicheng, JIA Guanghui, et al. Flow properties of dust suction mouth with curled edges[J]. Mechanical Science & Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(3): 362
- [3] 朱伏龙,张冠哲,陈杰.真空吸尘车吸尘口的流场仿真和结构优化[J].机械设计与制造,2008(11):50
ZHU Fulong, ZHANG Guanzhe, CHEN Jie. Flow field analysis and structure optimization of vacuum sweeper suction mouth[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(11): 50
- [4] 郭关柱.新型轨道吸污装置吸污能力研究[J].中国铁道科学,2011,33(2):76
GUO Guanzhu. Research on the waste suction capacity of new track waste suction apparatus[J]. China Railway Science, 2011, 33(2): 76
- [5] 张灵,史天亮.铁路道床吸污车吹吸装置流场数值模拟及结构优化[J].铁道科学与工程学报,2015,12(2):419
ZHANG Ling, SHI Tianliang. Numerical simulation of flow field and optimization of blowing-suction apparatus for railway ballast bed cleaning truck[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(2): 419
- [6] 张灵,史天亮.轨道交通道床吸污车吸污性能优化与验证[J].城

市轨道交通研究,2016,19(8):74

- ZHANG Ling, SHI Tianliang. Optimization and test of the dust absorption of railway ballastbed cleaning truck[J]. Urban Rail Transit Research, 2016, 19(8): 74
- [7] 郝元,成凯,姜希同,等.反吹式吸嘴流场数值分析及吸尘效率研究[J].西南交通大学学报,2016,51(1):105
XI Yuan, CHENG Kai, LOU Xitong, et al. Research on numerical analysis and dust collection efficiency of reverse blowing pickup mouth[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(1): 105
- [8] 黄文翰.6 t 干式扫路车整车设计及吸嘴研究[D].长春:吉林大学,2014:57
HUANG Wenhan. Overall design and research on dust sucking mouth of 6 t dry sweeper[D]. Changchun: Jilin University, 2014: 57
- [9] 杨春朝.地铁真空吸尘口吸尘性能的研究[D].长沙:中南大学,2014:57
YANG Chunzhao. Research on particle removal performance of vacuum dust suction mouth[D]. Changsha: Central South University, 2014: 57
- [10] 王福军.计算流体力学分析:CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:121
WANG Fujun. Computational fluid dynamics: principles and applications analysis in CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 121
- [11] SHIH T H, LIOU W W, SHABBAR A. A new k -epsilon eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227
- [12] 张兆顺,崔桂香,许春晓.湍流理论与模拟[M].北京:清华大学出版社,2005:209
ZHANG Zhaoshun, CUI Guixiang, XU Chunxiao. Theory and modeling of turbulence[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 209
- [13] 郝元.轻型扫路车反吹式吸嘴流动特性及吸尘效率优化研究[D].长春:吉林大学,2016
XI Yuan. Research on the flow characteristics and overall removal efficiency optimization of reverse blowing pickup mouth for a light sweeper[D]. Changchun: Jilin University, 2016
- [14] BAGNOLD R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. New York: William Morrow & Company, 1941:167
- [15] 朱伏龙.基于吸尘性能的吸尘口结构研究与流场分析[D].上海:上海交通大学,2008
ZHU Fulong. The structure research and flow field analysis of dust collection port based on sucking performance[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008
- [16] 李战军,郑炳旭.尘粒起动机理的初步研究[J].爆破,2003,20(4):17
LI Zhanjun, ZHENG Bingxu. Mechanism of the movement of dust particles[J]. Blasting, 2003, 20(4): 17
- [17] 刘滨,肖佩,熊孝伟,等.某型公铁两用清扫车吸尘系统仿真分析与优化[J].机械工程与自动化,2016(5):107
LIU Bin, XIAO Pei, XIONG Xiaowei, et al. Simulation analysis and optimization of certain type rail-cum-sweeper dust collection system[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2016(5): 107
- [18] 周玉珠.正交试验设计的矩阵分析方法[J].数学实践与认识,2009,39(2):202
ZHOU Yuzhu. A matrix analysis of orthogonal design[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2009, 39(2): 202

(编辑 魏希柱)