

# 基于 CFD 仿真分析的清扫车专用高效吸嘴优化设计

邓许连 张斌 李亮 周诚远 万军 吴作清

(长沙中联重科环境产业有限公司 湖南 长沙 410221)

**摘要:** 为提高清扫车作业效率,提升清扫车吸拾地面垃圾性能,采用 CFD 仿真分析方法对某型扫路机吸嘴内流场进行了流体仿真分析,从吸拾机理方面分析了现有吸嘴吸拾效率低的原因,分析出了影响吸嘴吸拾性能的三个关键因素。基于以上分析结果构建了3个优化吸嘴方案,在吸嘴试验台上对原吸嘴及3个优化吸嘴方案进行了实际清扫效果验证,试验结果显示,3个优化吸嘴方案吸拾效果均好于原吸嘴。

**关键词:** 清扫车; CFD; 内流场; 吸拾效率

## 0 引言

随着生活水平的不断提高,人们对生活环境的要求越来越高,清扫车<sup>[1]</sup>已经替代人工成为城市主、次干道清扫保洁的主力。吸嘴作为与垃圾接触的直接部件,其性能影响着垃圾的吸拾效果,因此开展清扫专用吸嘴吸拾性能的研究是业内亟待探索的研究方向。随着计算流体力学(CFD)的发展,仿真分析技术越来越广泛地应用到清扫车专用吸嘴的研究中。本文采用 CFD 仿真分析方法,对吸嘴内部流体流动进行了分析,从吸嘴方面找出了影响垃圾吸拾性能的三个影响因素,进而对吸嘴结构进行了优化及试验验证。

## 1 CFD 仿真分析

### 1.1 吸嘴几何模型及网格

本文数值模拟的吸嘴为某扫路车用吸嘴,清扫车原吸嘴如图1所示。采用 PRO/E 进行了三维实体建模,考虑到空气由大气区域急速进入吸嘴后通过吸嘴进入入

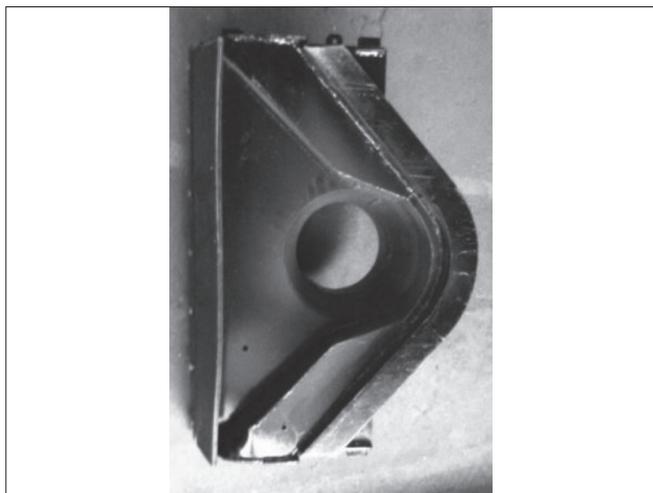


图1 清扫车原吸嘴图

吸箱,为精确模拟气体进入吸嘴流场所的变化,在吸嘴体外增加了一个大气区域,并将吸管考虑在计算区域内;采用 ICEM CFD 对其进行了网格划分,并考虑到吸嘴离地间隙小,因此在吸嘴离地间隙处进行密度盒加密处理,为充分考虑吸管褶皱处漩涡气流对结果的影响,在吸管褶皱处也进行了特别加密处理。划分网格及边界条件设置图如图2所示。

### 1.2 控制方程

专用吸嘴的气流流动是三维黏性不可压缩流动,气流吸拾尘粒遵循物理守恒定律,控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程、湍流输运方程。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \tau_{ij} \right) + \rho g_i$$

式中:  $u_i$  和  $g_i$  为沿各自坐标方向的速度分量;  $\rho$  为流体密度;  $P$  为压力;  $\mu$  为粘度;  $\tau_{ij} = -\rho u_i' u_j'$  为雷诺应力;

湍流输运方程采用 RNG  $\kappa - \varepsilon$  湍流模型,该模型通

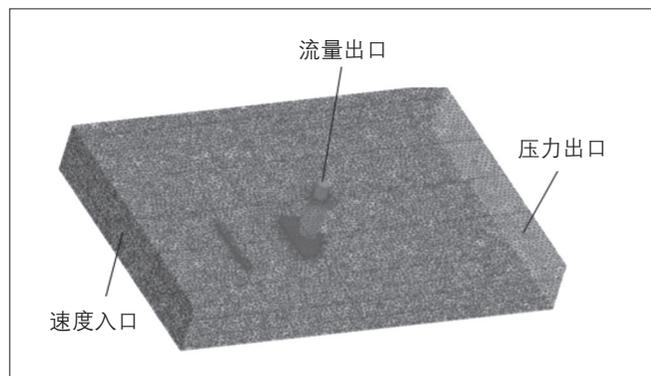


图2 划分网格及边界条件设置图

过对湍流黏性进行修正,考虑了曲率效应对流动的影响,与标准模型相比可以较好地处理吸嘴狭缝处气流流线弯曲程度较大的流动。在 RNG  $\kappa-\varepsilon$  模型中,  $\kappa$  方程和  $\varepsilon$  方程分别如下。

$\kappa$  方程:

$$\rho u_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon$$

$\varepsilon$  方程:

$$\rho u_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}}{\kappa} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa}$$

湍流黏度为:

$$\mu_t = \frac{c_\mu \rho \kappa^2}{\varepsilon}$$

式中:  $\kappa$  为湍动能;  $\varepsilon$  为湍流耗散率;  $\mu_t$  为湍流粘度; 模型常数分别  $C_{2\varepsilon} = 1.68$ ,  $\sigma_\kappa = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

### 1.3 边界条件

因清扫车作业时以一定速度向前行进,因此设定前方空气面为速度进口,空气以 10m/s 的速度进入流体区域;后方空气面为压力出口,扫路车工作时,风机运转(以一定流量抽吸计算域外空气进入),因此吸管的上平面设为流量出口,值设定为清扫车工作时的风机流量,其余边界设为壁面边界条件。具体边界条件设置见图 3。

### 1.4 离散格式及算法

离散方法采用有限体积法,压力-速度耦合关系采用 SIMPLEC 算法,湍动能、耗散率、动量方程的离散采用二阶迎风格式,通过残差和进、出口压力通量差值的监测判断收敛情况。

### 1.5 原吸嘴内流特性分析

图 3 为吸嘴离地 5mm 水平面的速度矢量图,从图中可以看出,空气从前板进入吸嘴内部后,空气被迅速加速,中心流速超过 100m/s;由于空气流速过大,空气携带垃圾颗粒加速后冲,有些垃圾颗粒来不及被吸拾即已从吸嘴后方流出,容易造成吸嘴后方中心处垃圾残留。

图 4 为吸嘴中心剖面的静压云图,从图中可以看出,吸管内箭头所示后方区域气体产生的负压很小,从而会造成空气在吸嘴后方及吸管后方对垃圾颗粒的向上拖拽力不足,垃圾颗粒不容易被吸拾。

图 5 为吸嘴中心剖面的速度矢量图,从图中可以看出,在吸嘴前方存在着一块的涡流区,图中标识为前涡区,同样在吸嘴后面同样存在着一个涡流区,图中标识为后涡区,由于前后两个涡流的存在,吸嘴用于吸拾垃圾颗粒的主通道面积很小,导致吸嘴吸拾能力不足。

## 2 影响因素及优化方案提出

### 2.1 影响吸嘴吸拾性能关键因素提出

基于以上对原吸嘴内流场的分析,我们总结分析出影响吸嘴吸入能力的关键因素如下。

(1) 吸嘴内腔负压。吸嘴内腔产生的负压降越大,空气对垃圾颗粒产生的向上拖拽力越大,越有利于垃圾颗粒被吸拾。

(2) 空气进入吸嘴后在吸嘴底部的水平流速大小。空气进入吸嘴后被迅速加速,产生很大的向后的水平速度,若水平速度过大,垃圾颗粒达到吸管下方以后有可能来不及被吸附到吸管内即向后俯冲出去。

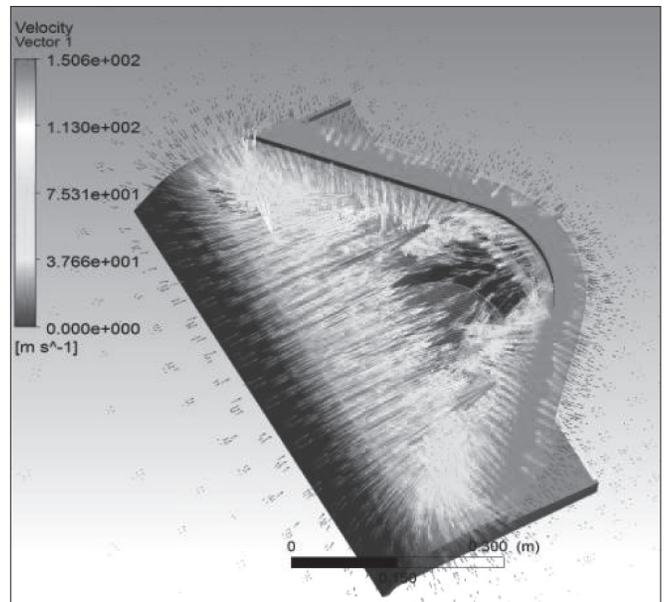


图 3 吸嘴离地 5mm 水平面的空气速度矢量图

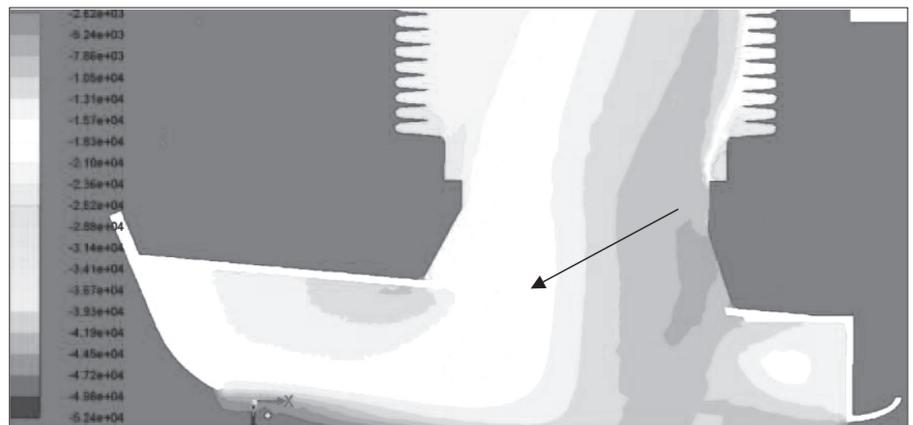


图 4 吸嘴中心剖面静压云图

(3) 垃圾颗粒在吸嘴内的吸附时间。垃圾在吸嘴下方被吸附的时间越长，越有利于垃圾被吸拾。

### 2.2 吸嘴优化方案提出

基于以上分析，提出了三个优化吸嘴方案，优化方案吸嘴图如图6所示。

(1) 吸嘴 a：将吸嘴前方设计成外扩型，并适当外扩吸嘴两翼。

理论分析：该优化方案可将吸嘴前方漩涡分流到吸嘴左右两侧，增大吸嘴有效吸附面积，且由于吸嘴内部面积减小，吸嘴内腔负压降增大，吸附能力增强；同时由于吸嘴前方吸入面积增大，空气进入吸嘴后的水平流速减小，能避免由于流速过大垃圾从吸嘴后方泄漏的情况。

(2) 吸嘴 b：在原吸嘴后方添加胶皮挡板，使得吸嘴后方与地面间隙变小，从而使得吸嘴内腔负压降增大，吸嘴吸拾能力增强。

(3) 吸嘴 c：在原吸嘴后方增加了另一个吸口(吸管)，即双吸口吸嘴，可增加垃圾颗粒在吸嘴内部的吸附时间，吸附能力增强。

### 3 试验验证

为验证3个优化方案的吸拾效果，在吸嘴试验台进行了垃圾吸拾试验。吸嘴试验台如图7所示。试验条件为：沙尘铺设宽度为3m，样品密度为 $2500\text{kg}/\text{m}^3$ ，试验路面上均匀铺设尘粒样品床层，床层质量率为 $0.3\text{kg}/\text{m}^2$ 。试验时，预调风机

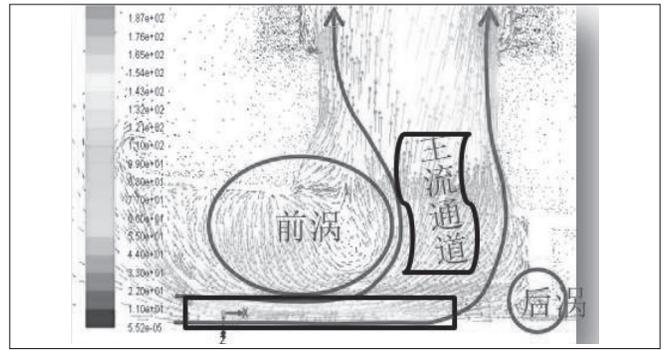


图5 吸嘴中心剖面空气速度矢量图

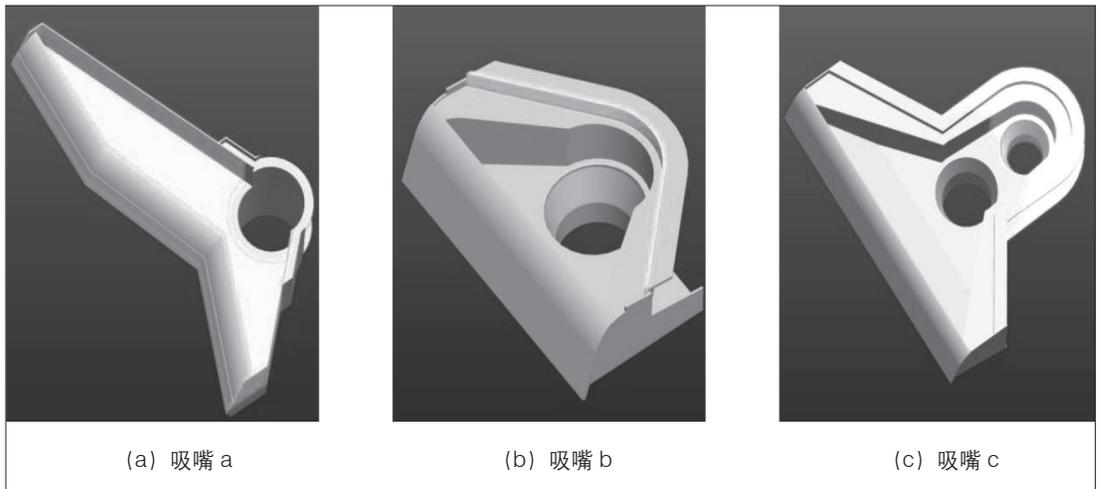


图6 优化方案吸嘴图



图7 吸嘴试验台

使真空管出口压力为 -2000Pa，通过称量试验前后的沙尘质量来计算吸嘴在作业速度为 6 ~ 14km/h 时的吸拾效率。吸拾效率计算公式为：

$$\eta = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$

式中： $m_1$  为试验前铺设沙尘质量； $m_2$  为残留沙尘质量。

图 8 为不同行车速度下得到的原吸嘴和三个优化方案吸嘴的吸拾效率曲线图。可以看出，随着行进速度的增大，原吸嘴与优化方案吸嘴的吸拾效率均降低，但优化方案吸嘴的整体吸拾效率明显高于原吸嘴。三个优化方案吸嘴中，吸嘴 b 的吸拾效率最高，吸嘴 c 次之；且随着行车速度的提高，优化方案吸嘴的优势也更加明显。

#### 4 结语

(1) 本文采用 CFD 仿真分析方法，找出了影响吸嘴吸拾性能的 3 个关键因素；

(2) 基于优化改进方向提出的 3 个优化方案吸嘴，试验结果显示吸拾效率均好于原有吸嘴，为今后吸嘴的优化设计指明了方向。

#### 参考文献：

[1] 李钢, 樊守彬, 钟连红, 等. 北京交通扬尘污染控制研究[J]. 城市管理与科技, 2004, 6(4): 151-152+158.  
 [2] 陈忠基, 吴晓元, 徐广谱, 等. 路面清扫车吸嘴装置的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(12): 1483-1485.  
 [3] 曾广银, 李欣峰, 肖田元, 等. 公路清扫车吸尘系统仿真设计[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12): 2770-2773.  
 [4] 徐云, 李欣峰, 肖田元, 等. 计算流体力学在清扫车仿真分析中的应用研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 270-273.

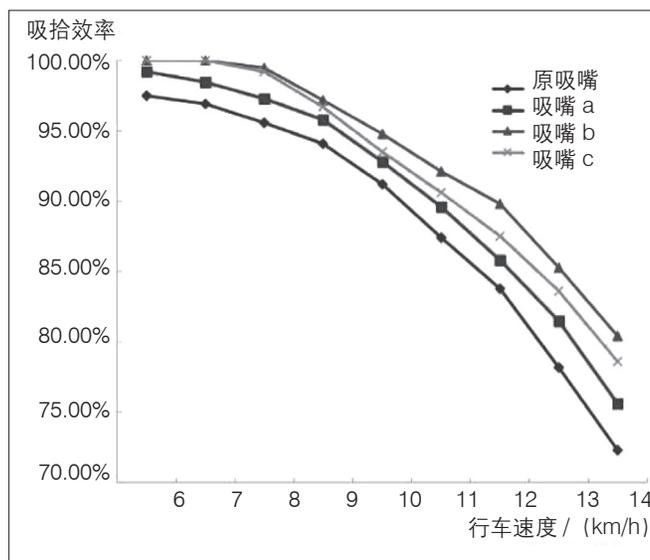


图 8 不同行车速度下的吸嘴吸收效率曲线图

[5] 张斌, 李亮, 肖庆麟, 等. 扫路车专用吸嘴内部流场仿真分析与优化设计[J]. 工程机械, 2016, 47(6): 19-26.

[6] 张建国, 李亮, 张斌, 等. 扫路车专用吸嘴数值模拟与内流特性分析[J]. 建设机械技术与管理, 2018(9): 62-66.

**作者简介：**邓许连(1984.06-), 女, 汉族, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 环卫机械流体系统及其部件内流特性的机理研究、数值仿真、测试分析与优化设计; 张斌(1983.10-), 男, 汉族, 江西鄱阳人, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向: 环卫机械流体系统及其部件内流特性的机理研究、数值仿真、测试分析与优化设计。

(上接第 8 页)

死, 从而造成卡机。

文中提及的新型多功能双护盾 TBM 通过创新性的结构设计, 实现了主驱动的便捷抬升、伸缩外盾变径、主机姿态滚转的有效调整。通过掘进过程中前盾和伸缩外盾的动态支持和调整提高双护盾 TBM 在不良地层中的通过性。

#### 参考文献：

[1] 洪开荣. 近 2 年我国隧道及地下工程发展与思考(2017-2018 年)[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(05): 710-723.  
 [2] 宋天田, 李宏波, 陈岗. 双护盾 TBM 在深圳地铁应用中存在的问题及对策[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(06): 998-1004.

[3] 谷婷, 卢松, 李苍松. 引红济石调水工程双护盾 TBM 施工段卡机脱困地质分析[C]//2011 年全国工程地质学术年会论文集, 2011: 437-441.

[4] 杨晓迎. TBM 在深埋超长隧洞断层破碎带卡机脱困施工技术[C]//中国水利学会地基与基础工程专业委员会第十一次全国学术技术研讨会论文集, 2011: 472-477.

[5] 崔旭, 张玉. 膨胀岩的判别分级与隧洞工程[J]. 甘肃水利水电技术, 2000(03): 186-191.

[6] 刘芑呈, 邵文东, 贺杰. 浅谈 TBM 掘进中的地质灾害及防治措施[J]. 水利水电技术, 2006(04): 49-50+53.

**作者简介：**谢作成(1987.08-), 男, 汉族, 福建厦门人, 本科, 工程师, 研究方向: 工程技术。