

新型洗扫车设计与仿真

徐慧超,吕钊钦*

山东农业大学机械与电子工程学院, 山东 泰安 271018

摘要: 针对现阶段人工清扫劳动强度大、效率低的问题, 设计出一种集扫地和洗地于一体的新型洗扫车。洗扫车采用重力除尘、惯性除尘和喷雾除尘相结合的复合除尘原理, 创造性地将洗地后的污水引入除尘箱, 用于喷雾除尘。运用计算流体力学(CFD)对除尘系统进行流场仿真计算, 分析在引入污水和不引入污水两种情况下粉尘颗粒的运动状态。分析表明: 将污水引入除尘箱用于喷雾除尘, 可以有效地捕捉粉尘颗粒, 减少粉尘排放。洗扫车经济、实用, 具有巨大的推广应用价值, 适用于工厂车间、仓库、机场、车站等大型场所。

关键词: 洗扫车; 复合除尘; 流体力学; 仿真

中图分类号: U469.6+91

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2016)01-0095-04

Design and Simulation for a New Cleaning Sweeper

XU Hui-chao, LV Zhao-qin*

College of Mechanical & Electrical Engineering/Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

Abstract: Aiming at the problem of big labor intensity and low efficiency of human cleaning for some time, a new kind of cleaning sweeper with sweeping and washing was designed. It adopted the composite dust removing theory which combined gravity dust removing, inertia dust removing and spray dust removing and sucked the waste water after washing into dust removing box to spray creatively. It was used the computational fluid dynamics (CFD) to simulate the flow field of dust removing system and analyze the motion state of dust particles under the situation of sucking waste water or not. The results showed that sucking waste water into dust removing box to spray could effectively catch dust and reduce the secondary pollution. The cleaning sweeper was economical, practical and with great popularization and application value, suitable for factory workshop, warehouse, airport, station and other large places.

Keywords: Cleaning sweeper ; composite dust removing ; CFD; simulation

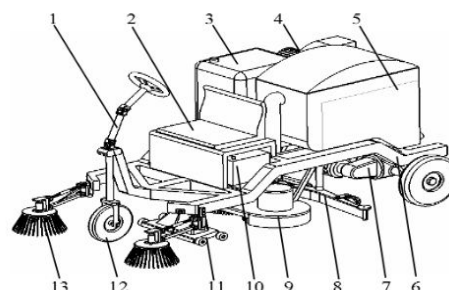
随着城市化进程的加快, 城市办公区、工业区、住宅区等场所不断增加, 清扫保洁工作日趋繁重, 人工清扫劳动强度大、效率低、成本高, 不再适用于大面积区域的清洁。根据 2006~2008 年《中国汽车工业年鉴》和 2009~2011 年《中国专用汽车行业年度数据服务报告》, 2006 年环卫清洁装备中的环卫车辆产量为 3962 台, 2011 年为 23315 台, 增长了 4.88 倍, 环卫清洁机械装备处在一个高速发展的黄金时期^[1]。洗扫车作为新一代路面作业清扫工具, 其应用范围越来越广泛^[2]。

除尘系统的设计是保证清扫车性能的关键。在清扫车除尘箱内采取合理的降尘措施对有效集尘非常重要。目前, 国产清扫车除尘系统的设计大多采用传统的设计方法, 即首先进行除尘箱与气路的结构设计, 然后制造出物理样机进行测试^[3], 需要多次反复设计。由于清扫车除尘系统的工作环境的复杂性, 传统的设计方法难以达到期望的效果, 这也是导致国产清扫车普遍存在除尘效果不好的主要原因。

根据清扫车的发展趋势, 结合现有清扫车和洗地车的结构以及工作原理, 进行功能集成并加以创新, 研究设计出一种集扫地、洗地于一体的新型洗扫车。对其除尘系统建立仿真模型, 运用计算流体力学仿真软件 FLUENT 对除尘箱流场进行仿真分析, 研究除尘箱内的空气流场及粉尘的运动规律, 以期提高洗扫车的降尘效果。

1 洗扫车总体结构和工作原理

洗扫车整体结构示意图如图 1 所示。



1 转向器 2 座椅 3 水箱 4 风机 5 除尘箱 6 车架 7 驱动电机
8 吸水机 9 洗地盘刷 10 蓄电池 11 吸口 12 导向轮 13 盘扫

图 1 洗扫车结构示意图

Fig.1 The structure of the cleaning sweeper

收稿日期: 2015-02-10

修回日期: 2015-04-27

作者简介: 徐慧超(1989-),男,硕士研究生,主要从事车辆结构设计与仿真工作. E-mail:xhc20092009@163.com

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail:lzqsda2003@126.com

整车工作原理是：洗扫车前进，液压马达驱动盘扫旋转将垃圾收集至吸口处，风机转动产生负压，将垃圾吸入管道落入除尘箱。同时，水泵驱动喷水管喷水，洗地刷盘旋转洗地，洗地后的污水由吸水扒吸入除尘箱。扫地的同时又能洗地，避免了人工清洁时先扫后拖的麻烦，减小工人的劳动强度，清洁效率高、效果好，节约能源。

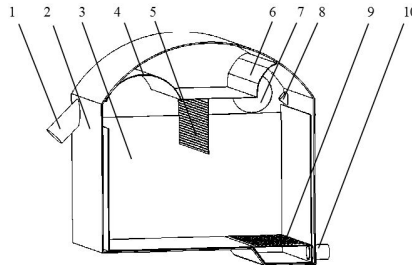
2 除尘系统的设计

2.1 除尘原理

目前，吸扫式清扫车的除尘机理主要有：

- (1) 重力沉降除尘。含尘气体依靠重力作用自然沉降，以达到分离尘粒、净化气体的目的。
- (2) 惯性除尘。利用尘粒在运动过程中惯性力大于气体惯性力的作用，将尘粒从含尘气流中分离出来，使气体得以净化。
- (3) 湿式喷雾除尘。利用雾化水对微细尘粒的截获捕集作用和湿尘团的碰撞凝并作用来改善垃圾状态，提高系统除尘效率。

洗扫车采用重力除尘、惯性除尘、湿式除尘相结合的除尘原理，结构图如图 2 所示。



1 进气口 2 除尘箱 3 垃圾斗 4 弧形挡板 5 帘网 6 挡板 7 出气口 8 进水管 9 孔板 10 出水管

图 2 除尘系统结构示意图

Fig.2 The structure of dust removing system

含尘气流进入除尘箱，大粒径粉尘颗粒因自重下落。在气流与弧形挡板的碰撞过程中，尘粒因惯性作用，其运动方向和速度大小得以改变，从而从运载空气中分离出来。经帘网一次过滤后，气流中的微小尘粒与进水口水流与挡板撞击而产生的雾化水珠结合而沉降。

2.2 除尘箱结构尺寸设计

垃圾尘粒进入除尘箱后，其运动可近似分解为在气流作用下的水平向前运动和重力作用下的垂直向下运动。而尘粒在重力作用下产生的重力沉降速度 v_g 可由著名的斯托克斯公式计算：

$$v_g = \frac{(\rho_s - \rho)d^2}{18\mu} \cdot g \tag{1}$$

其中， ρ_s 为尘粒密度，取 $2650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； ρ 为空气密度，取 $1.29 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； d 为尘粒当量直径，取 $1 \times 10^{-4} \text{ m}$ ； μ 为流体动力粘度，对于空气 μ 取 $1.84 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。根据式 (1) 可得，尘粒沉降速度为 $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。尘粒进入除尘箱后，其水平流速：

$$v_l = \frac{Q}{b \cdot h} \tag{2}$$

水平流速可初取与尘粒的平均沉降速度等值，并参照除尘效率要求的高低和是否采用喷雾输送进行适当修正。若除尘效率要求高，应适当降低水平速度，反之，则可适当提高^[4]。设计采用喷雾除尘，因此这里水平流速 v_l 可适当高于平均沉降速度，取 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； Q 为含尘空气流量，本设计的含尘空气流量是 $0.34 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ； b 为除尘箱宽度，取 0.5 m ； h 为除尘箱高度。根据式 (2) 计算可得除尘箱高度 h 约为 0.68 m 。

尘粒进入除尘箱后 t 秒钟时，水平运动距离为 $l=v_l \cdot t$ ，垂直向下沉降距离为 $h=v_g \cdot t$ ，变换后可得：

$$\frac{l}{v_l} = \frac{h}{v_g} \quad (3)$$

公式(3)即为沉降临界公式,经计算可得 $l=0.85\text{ m}$ 。即除尘箱长度约为 0.85 m 。

3 除尘箱流场仿真分析

计算流体力学(CFD)在清扫车设计中的应用,是对清扫车虚拟样机进行可行性分析的重要组成部分。通过采用 CFD 对样机的气路部分进行仿真,使得气路系统的性能分析可以和设计同步进行,避免了设计反复,缩短了设计周期,降低了试验成本,有利于实现优质快速开发设计^[5]。

3.1 除尘箱流场仿真建模与网格划分

为进行 CFD 分析,需要对除尘箱进行几何建模与网格划分。非结构化网格生成比较复杂,但却具有极好的适应性,对于复杂边界的流场计算特别有效。利用 FLUENT 前处理器 GAMBIT 对除尘箱进行了非结构化四面体网格的划分,网格数量达到 273089 个。考虑到垃圾斗、帘网对空气流场影响较小,划分网格时不予考虑。图 3 所示为除尘箱简化几何模型与网格结构。

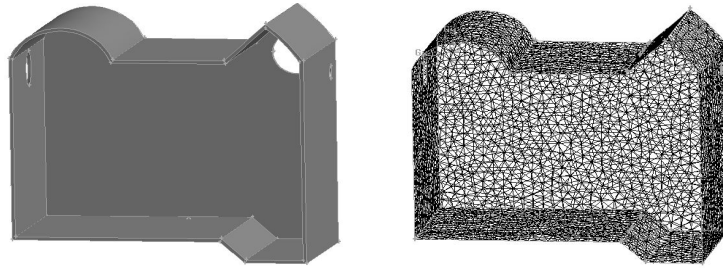


图3 除尘箱简化几何模型与网格结构

Fig.3 Simplified geometric model and mesh structure of dust removing box

3.2 流场求解计算参数的设定

采用分离求解器进行计算。首先对含尘气流进行模拟计算,不引入污水。计算模型使用离散相模型,空气相为连续相,尘粒为离散相。湍流模型为 $k-\varepsilon$ 双方程模型。首先对连续相进行计算,进风口边界条件为速度进口,经计算大小为 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,入射角度为 45° ,出口边界条件为 outflow,除尘箱底板壁面条件设置为 Trap。流场计算稳定后加入离散相即粉尘,粉尘喷射为面喷射,尘粒密度为 $2650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,粒径范围为 $1\sim 100\ \mu\text{m}$,平均粒径设为 $10\ \mu\text{m}$,质量流量设为估计值 $0.01\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。引入污水模拟时,为了考察水滴与尘粒的结合,需将水作为离散相加入,离散模型为随机碰撞 Stochastic collision、合并 Coalescence 和破碎 Breakup。根据洗地车实际工况,水流入射速度设为 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,粒径设为 $0.1\sim 1\text{ mm}$,质量流量设为 $0.02\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,打开组分运输模型。

3.3 数值模拟结果分析

完成求解参数的设定后,进行非稳态迭代计算。待残差曲线达到精度要求即计算结果收敛后,对粉尘颗粒进行跟踪计算,得到除尘箱内粉尘沉降规律。图 4 所示左右两图分别为在不引入污水和引入污水的情况下,除尘箱中心截面的速度等值线图。从图中可以看出,气流进入除尘箱后速度明显减小,在弧形挡板的作用下气流向底部运动,加速了尘粒沉降速度。但气流向下会吹起已经沉降在底部的垃圾,而污水的引入则可以有效地解决此问题。

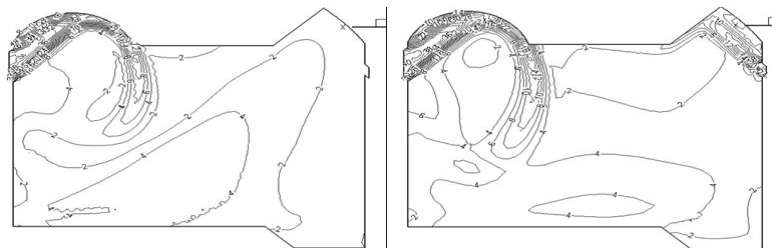


图4 除尘箱中心截面速度等值线图

Fig.4 Velocity contour map of the central section in dust removing box

图 5、图 6 所示分别为部分粒径的粉尘和水滴在除尘箱中的运动轨迹。由图 5 可以看出粉尘离开弧形挡板后向出口运动时，已经接近除尘箱中部，所以粉尘在除尘箱内的停留时间比较短，不利于捕获。因此可以适当减小弧形挡板的半径，以增加粉尘在除尘箱里的停留时间。从图 6 中可以看出水滴主要分布在除尘箱的后部，而此时的粉尘运动速度低，有利于捕获。

图 7 所示为水滴运动轨迹的俯视图。由图可见，水滴主要分布在出口的前部及左侧，这样可以有效地对粉尘进行捕捉，减少漏捕。但也可以看出有一部分水滴没有捕捉粉尘而直接逃逸出去，因此可以考虑在水流撞击点与出口之间设置挡板减少水滴逃逸。

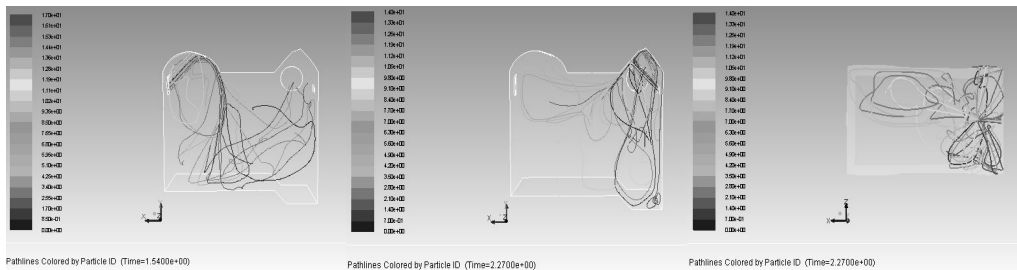


图 5 粉尘颗粒运动轨迹

图 6 水滴运动轨迹

图 7 水滴运动轨迹俯视图

Fig.5 Path-lines of dust particle Fig.6 Path-lines of water drops Fig.7 Overlooking path-lines of water drops

图 8 所示为粉尘颗粒追踪结果。对随机选取的 18 个粉尘颗粒进行跟踪，进行 6 次迭代计算，逐步加大迭代步骤，待迭代计算稳定后，统计计算结果。左右两边分别为不引入污水和引入污水的情况下，粉尘的逃逸结果。从图中可以看出，在引入污水情况下，粉尘逃逸数明显减少，可见，将污水进入除尘箱用于喷雾除尘可以有效地减少粉尘逃逸，提高除尘效率。此外，在出风口处设计安装磷铜滤网^[5]可进一步减少粉尘排放。

number tracked=18	escaped=4	aborted=0	number tracked=18	escaped=1	aborted=0
number tracked=18	escaped=6	aborted=0	number tracked=18	escaped=1	aborted=0
number tracked=18	escaped=7	aborted=0	number tracked=18	escaped=3	aborted=0
number tracked=18	escaped=7	aborted=0	number tracked=18	escaped=3	aborted=0
number tracked=18	escaped=7	aborted=0	number tracked=18	escaped=3	aborted=0
number tracked=18	escaped=7	aborted=0	number tracked=18	escaped=3	aborted=0

图 8 粉尘颗粒跟踪结果

Fig.8 Tracking result of dust particles

4 结论

CFD 仿真技术是对洗扫车除尘系统进行性能分析的有效手段，分析结果表明：除尘系统的结构设计基本合理，污水的引入使得除尘系统具有良好的除尘效果，对洗扫车的研发设计具有理论指导意义。但也有不足及需要改进的地方，具体情况如下：

- (1) 仿真没有针对性地对不同粒径的粉尘颗粒进行计算。
- (2) 适当减小弧形挡板的半径可以增加粉尘在除尘箱里的停留时间，利于降尘。
- (3) 在污水撞击点与出口之间增设挡板，减少水滴逃逸，提高捕获率。
- (4) 将污水进入除尘箱用作喷雾除尘，并没有考虑到污水中的杂质对粉尘的捕获有没有影响，这里需要进行进一步的研究。

参考文献

[1] 陈以国.环卫清洁机械装备行业市场分析[J].环境卫生工程,2012,20(1):56-57
 [2] 张宗达.洗、扫、吸三结合的新型道路保洁模式[J].商用汽车,2011(22):52-55
 [3] 陈仲基,吴晓云,徐广晋,等.路面清扫车吸嘴装置的实验研究[J].同济大学学报,2001,29(12):1483-1485
 [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
 [5] 杜 鹃.沥青路面铣刨碎料清理车除尘系统的设计及仿真[D].西安:长安大学,2008:27-39