

扫吸式吸入口流场仿真分析研究

陈思林^{1,2}, 杨旭东¹, 马春林², 秋 实²

(1. 西北核技术研究所, 陕西西安 710024; 2. 西北工业大学, 陕西西安 710068)

摘 要:针对扫吸式吸入口流场仿真分析中模型建立和分析方法选择的难题,选取 Fluent 中的多参考系模型(MRF)作为建模方法,确定了扫滚相对于吸入口罩壳之间的速度换算公式。通过改变扫滚转速和输料管与扫滚之间的中心距,研究了影响扫吸式吸入口空气流量和入口速度变化的因素,并绘制出扫滚壁面和入口速度云图。最后根据分析结果,优化了扫吸式结构尺寸和运行参数。结果表明,采用多参考系模型可以实现扫吸式吸入口内部流场的仿真分析研究;对于作业宽度为 400 mm 的扫吸式吸入口,当扫滚转速为 300 rad/min,输料管与扫滚之间的中心距为 350 mm 时,吸入口内部空气流量和入口速度最大。

关键词:吸入口;动网格;流场分析;多参考系模型

中图分类号:TP391.9 文献标志码:A

Simulation analysis of flow field of sweeping and sucking style sucking inlet

CHEN Si-lin^{1,2}, YANG Xu-dong¹, MA Chun-lin², QIU Shi²

(1. Northwestern Nuclear Technology Institute, Xi'an Shaanxi 710024, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710068, China)

Abstract: In view of the problem of model establishment in the simulation analysis, the Multi Reference Frame model is selected. The reduction formula of the velocity between absolute reference frame and relative reference frame is determined. Factors influencing air mass flow and speed at sucking inlet are studied by changing rotating speed and the distance between material transport pipe and the roller. According to the results, the structure size and operation parameters are optimized. The results show that the Multi Reference Frame model can realize the flow field simulation analysis. For assignment width of 400 mm, when the roll speed is 300 rad/min and the distance between transport pipe and roller is 350 mm, the air mass flow and speed at sucking inlet are the largest.

Key words: sucking inlet; dynamic mesh; flow field analysis; MRF model

气动收集是一种依靠空气流动进行物料收集的作业方式,一般用于散料的收集和输送。气动收集装置的吸入口分为 2 种:纯吸式和扫吸式。其中纯吸式依靠系统在吸入口附近产生的负压和气流流动,对地面散落的物料进行收集;扫吸式是一种吸入口结合扫-吸功能的收集装置,其扫滚相对于地面作旋转扫刷转动,可以破开板结壳,实现板结地面物料的收集。

文献[1]中,谢立杨介绍了国外路面清扫车的发展概况,其收集装置主要由安装在车体两侧的盘刷和车体中央的吸入口组成,能够进行清扫路沿、边沟等路面的物料收集。文献[2]和文献[3]中分别对扫吸式清扫

车的盘刷(滚刷)结构尺寸和布置形式进行了介绍,盘刷的作用是将作业半径外地面散落的物料刷起并带动到吸入口作业范围内进行收集。从目前扫吸式吸入口的研究现状来看,多集中在吸入口结构尺寸、盘刷安装位置优化等方面,而扫吸式吸入口内部流场仿真分析研究的相关报道很少,吸入口内部流场仿真分析的难点在于模型的建立和气流运动方程的计算。从扫吸式吸入口的研发来看,扫吸式收集装置的设计方法主要依靠大量的模型试验来修改和改进,存在吸入口研发周期长、成本高等缺点。随着计算机计算能力和流体力学软件的研发,数值试验也越来越多地应用于产品的实验。数值试验是通过由计算机和 CAD/CFD 软件组成的数值实验台(NTS),进行产品各工况的三维流场数值模拟分析和性能预测。数值模拟技术为设计人员提供了在不同环境和结构参数的情况下,观察产品内部和外部三维流场压力分布、速度变化和流动状态的途径,较大地缩短了产品的研发和更新周期^[4]。

笔者利用流体力学计算软件 Fluent 中的动网格技术,建立了扫吸式吸入口的分析模型,通过改变吸入口结构和运行参数,对其内部流场的气体流量、壁面速度、入口速度分布进行了分析。

1 模型的建立

1.1 物理模型的建立

为了实现板结地面物料的收集并防止二次扬尘的产生,拟设计的吸入口为全封闭卧式结构,即扫滚与集料板安装在封闭壳体内,通过电机驱动扫滚转动,将地面物料扫起并送到集料板上,输料管依靠系统产生的负压将物料吸走并储存在集料箱中,扫吸式吸入口结构尺寸见图 1。

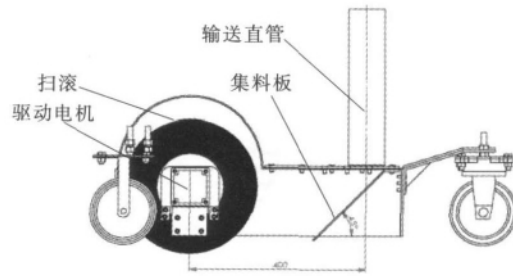


图 1 扫吸式吸入口结构尺寸

Fig. 1 Physical dimension of sweeping and sucking style suction

1.2 数学模型的建立^[5-6]

在吸入口的任意一个控制体中,广义标量 Φ 的积分守恒方程为

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \Phi dV + \int_{\partial V} \rho \Phi (\mathbf{u} - \mathbf{u}_g) \cdot d\mathbf{A} = \int_{\partial V} \Gamma \nabla \Phi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\Phi dV. \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; \mathbf{u} 为速度向量; \mathbf{u}_g 为移动网格的网格速度; Γ 为扩散系数; S_Φ 为源项; ∂V 代表控制体 V 的边界。

式(1)中的时间导数项,可以用一阶后向差分格式写成:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \Phi dV = \frac{(\rho \Phi V)^{n+1} - (\rho \Phi V)^n}{\Delta t}. \quad (2)$$

式中: $n, n+1$ 代表不同的时间层。 $n+1$ 层上的 V^{n+1} 由式(3)计算:

$$V^{n+1} = V^n + \frac{dV}{dt} \Delta t. \quad (3)$$

式中: dV/dt 是控制体的时间导数。为了满足网格守恒定律,控制体的时间导数由式(4)计算:

$$\frac{dV}{dt} = \int_{\partial V} \mathbf{u}_g \cdot d\mathbf{A} = \sum_f^{n_f} \mathbf{u}_{kj} \cdot \mathbf{A}_j. \quad (4)$$

式中: n_f 是控制体积的面网格数; \mathbf{A}_j 为面 j 的面积向量。点乘 $\mathbf{u}_{kj} \cdot \mathbf{A}_j$ 由式(5)计算:

$$\mathbf{u}_{kj} \cdot \mathbf{A}_j = \frac{\delta V_j}{\Delta t}. \quad (5)$$

式中: δV_j 为控制体积面 j 在时间间隔 Δt 中扫过的空间体积。

2 流场分析及结构优化

本文中的吸入口扫滚转动所形成的流场属于单一旋转系中的流动。在流场分析中,将扫滚近似看作具有周期性转动特性、转速固定的叶轮,将吸入口外罩壳看作轮盖,在此类情况下,由于叶轮周期性地掠过求解

域,相对于惯性参考系来讲,流动是不稳定的。在不考虑静止部件的情况下,取旋转部件一起运动的1个计算域,那么相对于这个旋转参考系(非惯性)来讲,流动是稳定的,这样就简化了问题的分析^[3]。在Fluent中,提供了3种动网格分析模型:1)多参考系模型(MRF);2)混合平面模型;3)滑动网格模型。

MRF模型适用于以不同速度运动的2个相邻区域边界上的流动接近一致的情况;混合平面模型适用于以非定常流动为基础、每个计算域的流动情况不一致的计算,不能使用通用多相模型(VOF, mixture和Eulerian);滑动网格模型适用于不稳定流的计算,可以真实地反映出转子和定子之间的相互作用。由于扫吸式吸入口在工作时,扫滚相对于外壳的转动速度和方向是固定的,所以吸入口流场分析选择第1种分析模型,即多参考系模型(MRF)。

2.1 MRF模型中的速度公式^[7]

MRF模型中的速度计算主要是相对速度与绝对速度的转换。其中相对速度是每个计算子域相对于其他计算域的运动速度,在计算过程中,需要将子域的速度和速度梯度从移动参考系转换到绝对惯性参考系。

计算区域转轴的初始位置向量定义为

$$r = x - x_0 \quad (6)$$

式中: r 是笛卡尔坐标的位置向量; x_0 是计算区域转轴的初始位置,如图2所示。

移动参考系的相对速度通过以下方程转换为绝对(静止)参考系的值:

$$v = v_r + (\omega \times r) + v_t \quad (7)$$

式中: v 是绝对惯性参考系的速度; v_r 是相对非惯性参考系的速度值; ω 是转轴转速; v_t 是非惯性参考系的平移速度。

根据定义的相对速度,绝对速度向量的梯度以式(8)计算:

$$\nabla v = \nabla v_r + \nabla(\omega \times r) \quad (8)$$

2.2 流场仿真结果分析

影响扫吸式吸入口工作效率的参数共有2个:扫滚转速 ω 和扫滚中心与输送直管中心之间的距离 A 。其中,扫滚转速影响吸入口的破壳功能和吸入口风量;中心距 A 影响吸入口的收集效率。要提高吸入口的破壳能力和收集效率,就要使吸入口的壁面气流速度和内部空气流量达到最大。

本文设计的扫吸式吸入口作业宽度为0.4 m,输料管直径为0.08 m。为方便理论分析,将扫滚简化为绕 Z 轴旋转的圆周壁面,刷毛简化为4个叶轮;将扫滚转速 ω 调节参数设定为100,300,500 rad/min,中心距 A 调节参数设定为0.3,0.35,0.4 m。图3是利用流体力学分析前处理软件Gambit建立的三维分析模型,采用混合六边形方法进行网格化,取扫滚中心为坐标原点,为分析方便,将扫滚表面的刷毛简化为四排叶轮式结构。

图4为扫滚叶轮表面速度变化曲线,横坐标为叶轮与扫滚中心之间的距离,纵坐标为气流速度。从图4中可以看出,当 A 一定时,扫滚壁面气流速度随着扫滚转速 ω 提高而变大,当转速由100 rad/min增加到500 rad/min时,扫滚壁面速度由0.77 m/s增加到7.25 m/s。图5为吸入口气流速度分布,横坐标为分析节点与吸入口后端距离,纵坐标为气流速度。从图5可以看出,当扫滚转速 ω 一定时,入口气流速度随着 A 的不同而不同,气流平均速度在 A 为0.35 m时最大,为4.5 m/s。由吸入口水平方向速度分布情况可以得出,靠近输送直管附近的速度大于扫滚转动的后方,这也进一步说明了扫滚的转动可以提高吸入口内部的气流流动速度,使得吸入口在作业过程中能够更加容易地将地面物料吸起并运动到输送直管。

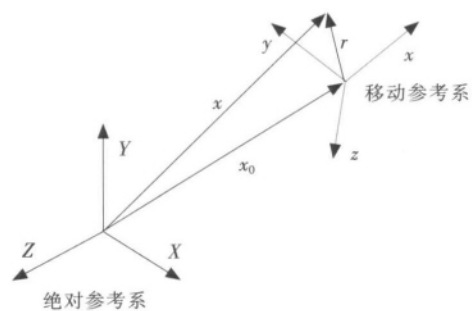


图2 相对速度坐标系

Fig. 2 Coordinate of relative velocity

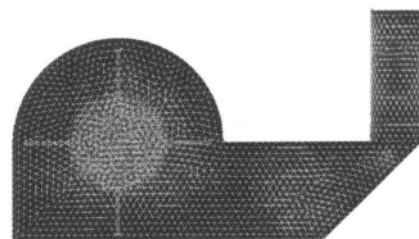


图3 网格模型

Fig. 3 Mesh grid

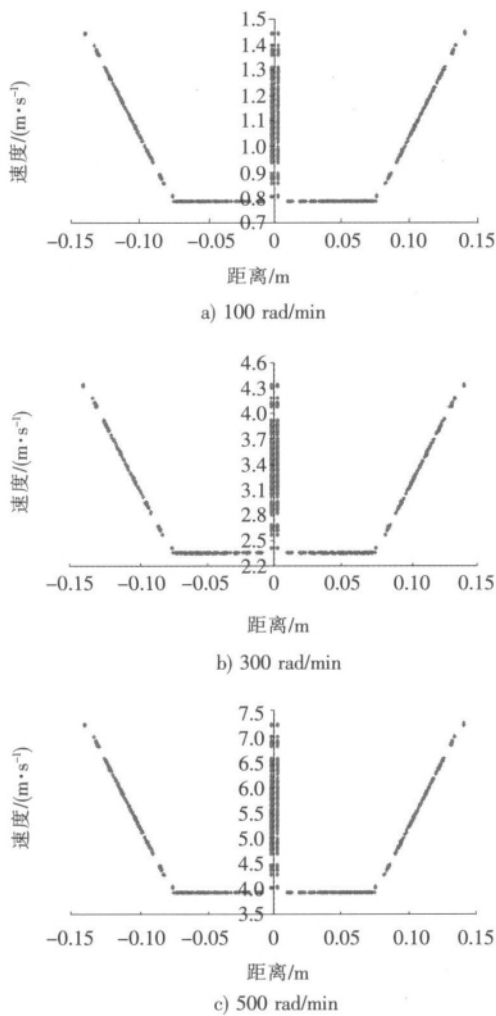


图 4 扫滚叶轮壁面速度分布 ($A = 0.35 \text{ m}$)
Fig.4 Velocity distribution of wall of impeller plate ($A = 0.35 \text{ m}$)

吸入口空气质量流量 G 与扫滚转速 ω 、中心距之间关系曲线见图 6。从图 6 可以看出,当扫滚转速 ω 小于 300 rad/min 时,吸入口空气质量流量随着 A 的增加而增加,扫滚转速 ω 大于 300 rad/min 时,随着 A 增加而减小。

当吸入口扫滚转速 ω 为 300 rad/min ,中心距 A 为 0.35 m 时,吸入口内部空气质量流量和入口平均速度最大。此时,吸入口内部空气质量流量为 0.021 kg/s ,入口平均速度为 4.5 m/s 。

3 结 论

- 1) 基于动网格技术的 MRF 模型可以实现扫吸式吸入口内部流场的仿真分析研究。
- 2) 对于作业宽度为 0.4 m 的扫吸式吸入口,当扫滚转速为 300 rad/min 、输料管与扫滚中心距为 0.35 m 时,吸入口对于板结地面物料的收集效率最好。

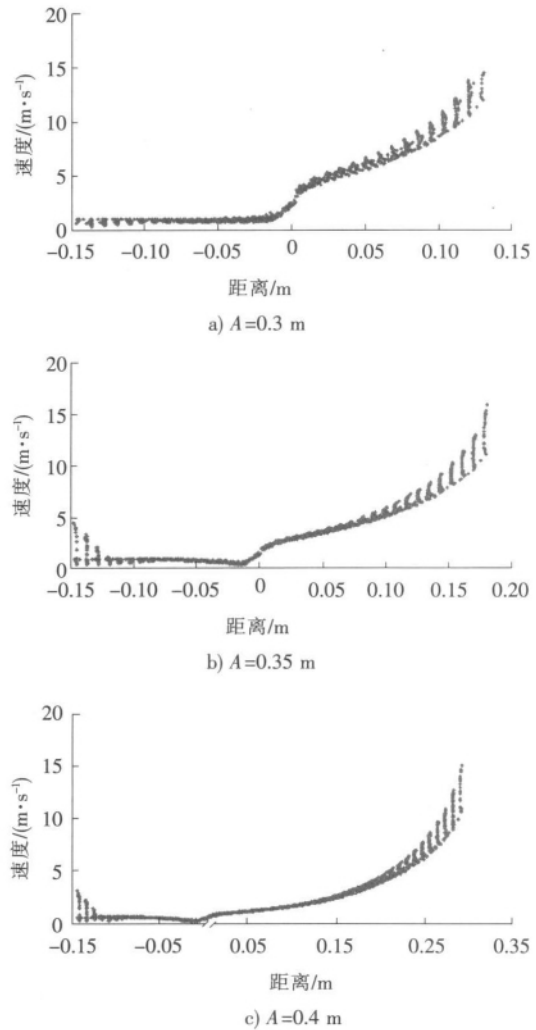


图 5 入口气流速度分布 ($\omega = 300 \text{ rad/min}$)
Fig.5 Velocity distribution of the inlet ($\omega = 300 \text{ rad/min}$)

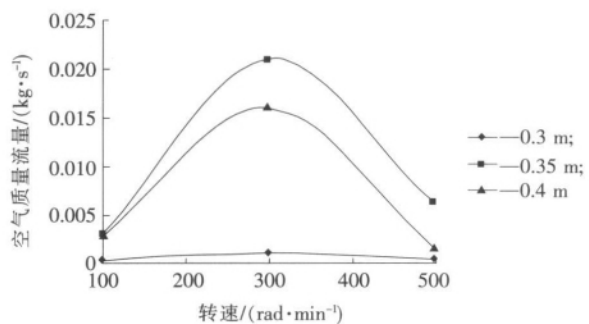


图 6 吸入口空气质量流量 G 与扫滚转速 ω 、中心距之间关系曲线
Fig.6 Relationship curve of air flow mass G and roller rotational speed ω and center distance A

参考文献:

- [1] 谢立杨. 国外路面清扫车概况[J]. 筑路机械与施工机械化(Road Machinery and Construction Mechanization), 1991, 8(6): 2-5.
- [2] 徐学耘. 真空清扫车[J]. 制冷空调与电力机械(Refrigeration Air Conditioning and Electric Power Mechinery), 1993(3): 32-35.
- [3] 徐 宁, 吴三达. 吸扫式扫路车的总体设计与研究[J]. 商用汽车杂志(Commercial Vehicle), 2006(6): 40-45.
- [4] VAUGHN H R, OBERKAMPF W L, WOLFE W P. Fluid motion inside a spinning nutating fluid-filled cylinder[J]. Fluid Mech, 1985, 11: 121-138.
- [5] MORUD K E, HJERTAGER B H. LDA measurements and CFD modelling of gas-liquid flow in a stirred vessel[J]. Chem Eng Sci, 1996, 51(2): 233-235.
- [6] DEEN N. An experimental and computational study of fluid dynamics in gas-liquid chemical reactors[D]. Denmark: Aalborg University, 2001.
- [7] PLACEK J, TAVLARIDES L L, SMITH G W. Turbulent flow in stirred tanks (II): A two-scale model of turbulence[J]. AIChE, 1986, 32(11): 1 771-1 778.

(上接第 125 页)

$$d = \frac{r_B f_B R_{B_{y0}}}{\sqrt{R_{B_{x0}}^2 + R_{B_{y0}}^2}} + l_1 \cos \varphi_1; \quad e = -\frac{r_B f_B R_{B_{x0}}}{\sqrt{R_{B_{x0}}^2 + R_{B_{y0}}^2}}; \quad f = -\frac{r_B f_B R_{B_{y0}}}{\sqrt{R_{B_{x0}}^2 + R_{B_{y0}}^2}};$$

$$h = \frac{r_C f_C R_{C_{x0}}}{\sqrt{R_{C_{x0}}^2 + R_{C_{y0}}^2}} - l_2 \sin \varphi_2; \quad g = \frac{r_C f_C R_{C_{y0}}}{\sqrt{R_{C_{x0}}^2 + R_{C_{y0}}^2}} + l_2 \cos \varphi_2;$$

$$\mathbf{R} = [R_{A_x} \quad R_{A_y} \quad R_{B_x} \quad R_{B_y} \quad R_{C_x} \quad R_{C_y}]^T,$$

$$\mathbf{F} = [-p(t) \quad G_1 \quad pl_{AS} \sin \varphi_1 + \frac{G_1 l_1}{2} \cos \varphi_1 \quad 0 \quad G_2 \quad \frac{G_2 l_2}{2} \cos \varphi_2]^T.$$

同理可求解出 $R_{D_x}, R_{D_y}, R_{E_x}$ 和 R_{E_y} 。

将上述所求反力代入式(8)—式(12)可求解出各转动副处所受摩擦力矩 $J_{fA}, J_{fB}, J_{fC}, J_{fD}, J_{fE}$ 。对上述各个转动副所受摩擦力矩大小的比较和分析,可以确定各构件的先后运动顺序。

2 结 论

1) 分析了机构在考虑摩擦力、重力情况下的摩擦力矩;并基于泰勒级数对摩擦力矩进行线性化处理,分析了摩擦力矩线性化处理后的误差。

2) 分析了杆件转动的条件,推出转动副处于相对转动和相对静止时所受力矩的关系式;并以五杆二自由度机构为例对机构的运动顺序进行了分析。

参考文献:

- [1] 王海文. 轧钢机械设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1983.
- [2] 李 林, 张 鉴. 变自由度机构的分析和应用[J]. 山东轻工业学院学报(自然科学版)(Journal of Shandong Institute of Light Industry(Natural Science Edition)), 1994, 8(3): 42-44.
- [3] 曲志刚, 李瑰贤, 安子军. 基于蜕变因子控制的机构构态转换原理及应用[J]. 机械工程学报(Journal of Mechanical Engineering), 2005, 41(2): 41-44.
- [4] 王 峰, 闫华军, 胡瑞雪. 平面变自由度机构蜕变位置的位置分析[J]. 河北工业科技(Hebei Journal of Industrial Science and Technology), 2011, 28(1): 19-22.
- [5] 王 峰, 安子军, 闫华军. 平面变自由度机构的形成方法和实现形式[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology), 2010, 31(3): 209-213.
- [6] 李端玲, 戴建生, 张启先, 等. 一种变胞机构——魔术花球的自由度分析[J]. 机械工程学报(Journal of Mechanical Engineering), 2002, 38(9): 12-16.
- [7] 吴艳荣, 金国光, 李东福. 基于 ADMAS 的变胞机构动力学仿真[J]. 机械设计与制造(Machinery Design & Manufacture), 2007(5): 87-88.
- [8] 曲继方, 安子军, 曲志刚, 等. 机构创新原理[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [9] 王 峰. 平面变自由度机构蜕变位置及运动顺序研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2005.