

抛雪风机的气固两相流场数值分析与结构优化

郑明军¹, 李张永¹, 吴文江²

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 工程训练中心, 河北 石家庄 050043;)

摘要:为探究抛雪风机在抛雪作业过程中内部流场的流动特性,揭示流场作用下雪的速度和浓度分布情况,优化风机结构,改善风机的抛雪性能,以自主研发的公铁两用除雪车为基础,利用CFD方法,建立了风机内部流场的气固两相流数值模型,对风机抛雪过程进行仿真研究。同时,对风机机壳形状、风扇叶片数以及叶片安装倾角等机构参数对气固两相流场和抛雪的影响进行了模拟分析与对比研究。结果表明:适当的机壳形状有利于改善流场的流动状况,提高抛雪能力;当风扇叶片安装倾角为 0° 、叶片数目为4时,风机内部流场流动情况更有利于积雪的抛送和减少能量的损耗。

关键词:抛雪风机;气固两相流;结构优化

中图分类号: TH123 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2020)02-0046-06

0 引言

在我国北方地区的冬季,降雪与风吹雪时常会将铁道线路掩埋,阻断铁路运输。覆盖在铁路上的积雪如果不能得到及时清除,将对我国各地间经济文化交流产生非常不利的影响。针对该问题,传统的解决方法是利用人工挖掘的方法清除积雪,但是人工除雪成本高,效率低,难以满足快速恢复铁路通行的要求。近年来,机械式除雪快速发展,该方式作业效率高,成本却比人工除雪低得多,因此得到了广泛的应用。

自主研发的除雪装置属于抛扬式除雪机械,在其使用过程中,出现抛雪效率低、能量消耗大、抛雪筒易发生堵塞等缺陷^[1]。抛雪风机是抛扬式除雪装置的关键结构之一,其结构是否合理直接决定了除雪装置的性能。风机内部的气固两相流场相当复杂^[2-3],难以直接观察其流动特性,因此文章利用CFD的方法,对风机内部的气固两相流场进行仿真研究,分析机壳形状、风扇叶片安装倾角和叶片数目等参数对气固两相流场和雪的速度浓度分布的影响,并对风机结构进行优化。

1 模型建立与仿真

抛雪风机进行抛雪作业的过程,是个非常复杂的非稳态、三维、不可压缩的气固两相流体运动过程。要对这个过程用数值方法进行完全的描述与计算,是不可能完成的^[4]。因此需要忽略掉一些非关键的流动特征,对CFD模型进行一些理想化的假设:

(1)抛雪风机内部流体为雪跟空气的混合物,不考虑其他的物质成分。

(2)由于风机风扇的作用,进入风机的雪密度会增大,取雪的密度为 688 kg/m^3 ,空气密度为 1.225 kg/m^3 。

(3)不考虑气体与雪的质量交换和能量交换,并把雪视为连续的流体^[5]。

(4)不考虑温度变化。

(5)把抛雪风机的壁面视为刚体。

收稿日期:2018-06-12 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20180612001

基金项目:国家自然科学基金(11472180);河北省自然科学基金(E2017210166);河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2017068)

作者简介:郑明军(1971—),男,博士,教授,研究方向为机械设计与理论。E-mail:zmjtd@stdu.edu.cn

郑明军,李张永,吴文江.抛雪风机的气固两相流场数值分析与结构优化[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(2):46-51.

(6)流体仅从入口进入,从出口抛出。

1.1 流道三维建模与网格划分

用 FLUENT 建模之前,首先要对抛雪风机的流道建立三维模型,流道直径为 720 mm,扇叶叶片旋转半径为 350 mm,宽度 300 mm,安装倾角为 0°,出风口尺寸为 300 mm×260 mm,保存为 .x_t 格式,建好的抛雪风机流道三维模型如图 1 所示。

将建好的三维模型导入 ANSYS workbench 软件的 geometry 模块,对模型进行分块处理,为后期 CFD 模型的参数设置提供便利。设置几何体类型为流体,切分风扇扇叶旋转的区域为静域,如图 2 所示,切分非扇叶旋转区域为动域,如图 3 所示,并将入口面、出口面、扇叶面分组命名。

将处理好的模型导入 FLUENT 软件的 mesh 模块进行网格划分,由于 mesh 模块的网格自动划分功能已经相当强大,设置网格划分质量为最好,自动划分网格,网格划分完成后如图 4 所示,整个模型划分网格数目为 57 408 个。

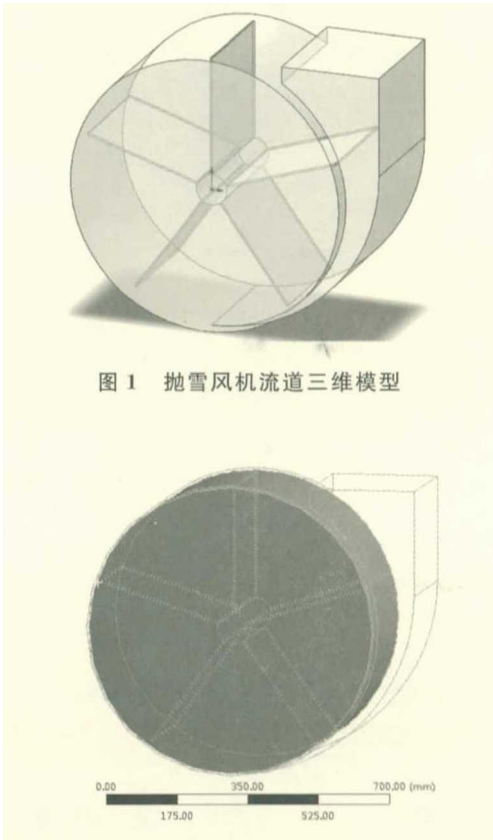


图 1 抛雪风机流道三维模型

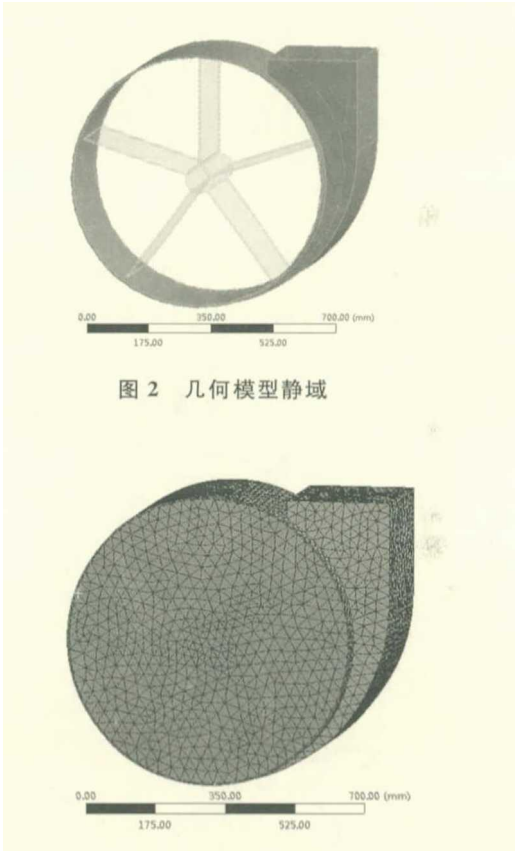


图 2 几何模型静域

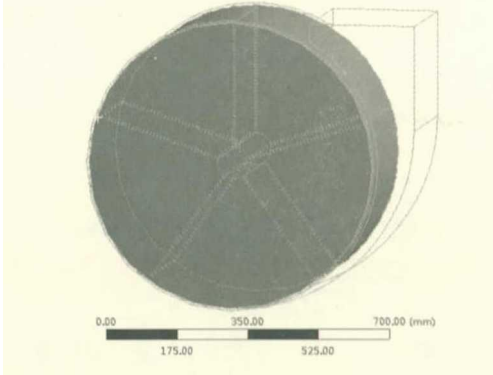


图 3 几何模型动域

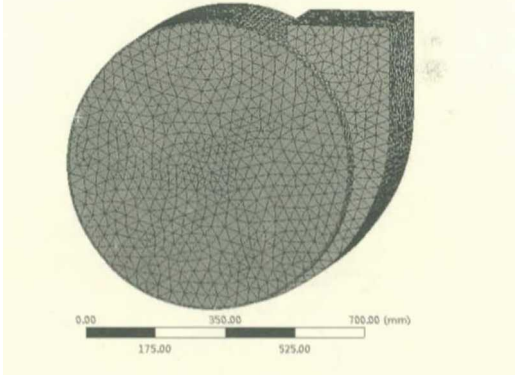


图 4 流道网格模型

1.2 流体区域与边界条件设置

抛雪风扇内部的气固两相流采用 Eulerian 多相流模型进行数值模拟计算,隐式求解法进行计算^[6]。湍流模型采用的是标准 $k-\epsilon$ 模型^[7],边界条件为无滑移壁面边界条件。定义流道模型的前面为入口面,定义抛雪筒面为出口面,如图 5 所示。设置空气密度为 1.225 kg/m^3 ,黏度为 $1.789\text{ 4e-}05\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。雪的密度为 688 kg/m^3 ,黏度为 $1.72\text{ e-}05\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

在进行 CFD 数值计算时,选择 MRF 模型即多重参考系模型模拟抛雪风机的内部旋转流场,风扇扇叶所在旋转区域为动域,设定在运动坐标系,风扇转速设为 700 r/min

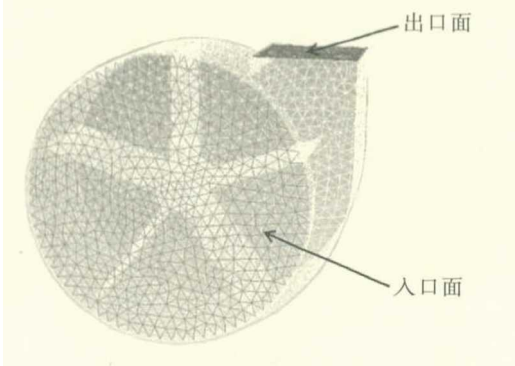


图 5 定义入、出口面

其余部分处于静止状态为静域,设定在固定坐标系。抛雪风机的进雪口即入口面设置为速度入口,混合物料中空气与雪的体积分数各占 50%,进料速度为 0.3 m/s。出口处定义为压力出口,压力边界大小为标准大气压值。设置完成后,进行仿真计算,计算结果收敛。

2 仿真结果分析

仿真计算完成后,用 FLUENT 的后处理模块对仿真结果进行分析处理,得到了 Z 等于 150 mm 处抛雪风机剖面的压力云图、雪的速度云图、雪的体积浓度云图和雪的速度矢量图。如图 6~图 9 所示。

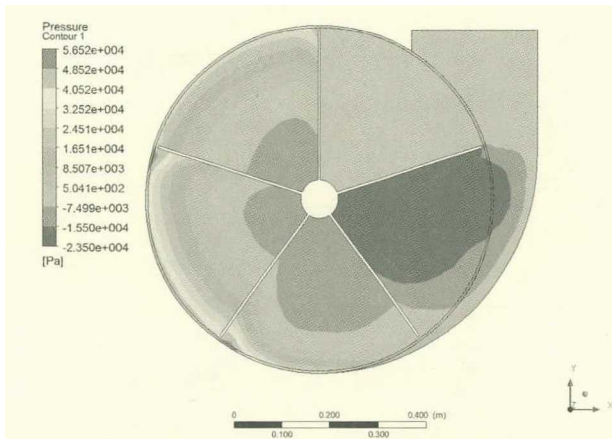


图 6 $Z=150$ mm 处剖面压力云图

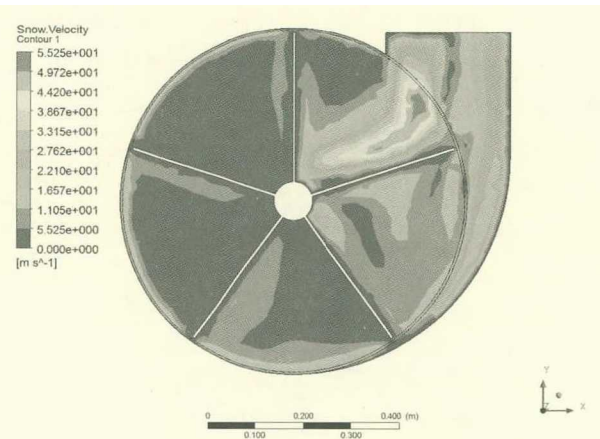


图 7 $Z=150$ mm 处剖面雪的速度云图

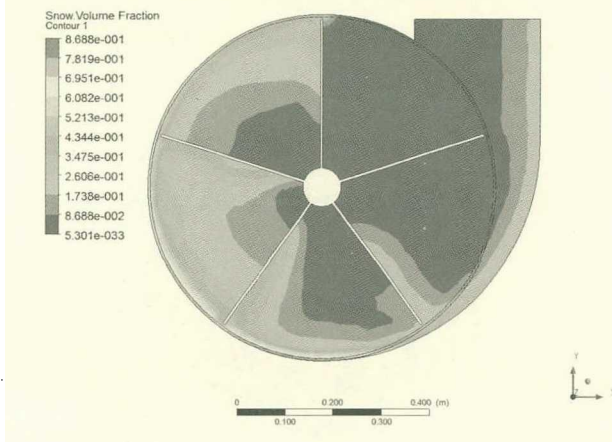


图 8 $Z=150$ mm 处剖面雪的体积浓度云图

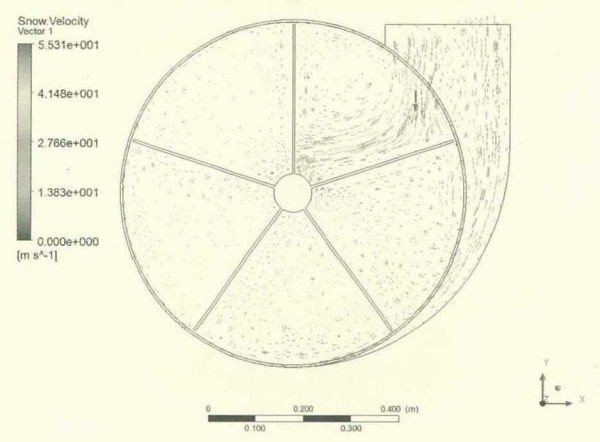


图 9 $Z=150$ mm 处剖面雪的速度矢量图

由压力云图可知,抛雪风机内部压力值要小于外界标准大气压,风扇旋转将流体排向抛雪筒,使风扇筒内形成了低压区,对风机外空气产生吸引的效应,其中,抛雪筒下方区域压力值最低。

由雪的体积浓度云图可知,雪在风机内部各区域浓度分布并不均匀,在出口处浓度最低,底端远离出雪口处雪的浓度最高,最高体积分数达到 0.868 8。由雪的速度云图和速度矢量图可知,在抛雪筒的左端出现了比较严重的涡流和回流现象,且速度很高,达到了 55.25 m/s,雪在抛雪筒的出口处速度约 22 m/s,且抛雪风机的机壳在风机的最低点处开始与风扇产生越来越大的空隙,使雪在风机的最低端与风扇叶片脱离,抛出方向向右,并沿着机壳向上滑移,当雪运动到抛雪筒出口处时,产生了严重的速度损失。因此需要对抛雪风机的机壳结构进行优化设计。

3 风机结构参数分析与优化

3.1 抛雪风机的机壳结构优化

为了减少抛雪风机抛雪作业时的速度损失,对风机壳进行结构优化,将抛雪筒向左移动,使雪在脱离

风扇时的速度方向垂直向上。优化前后的雪的速度云图对比如图 10 所示。

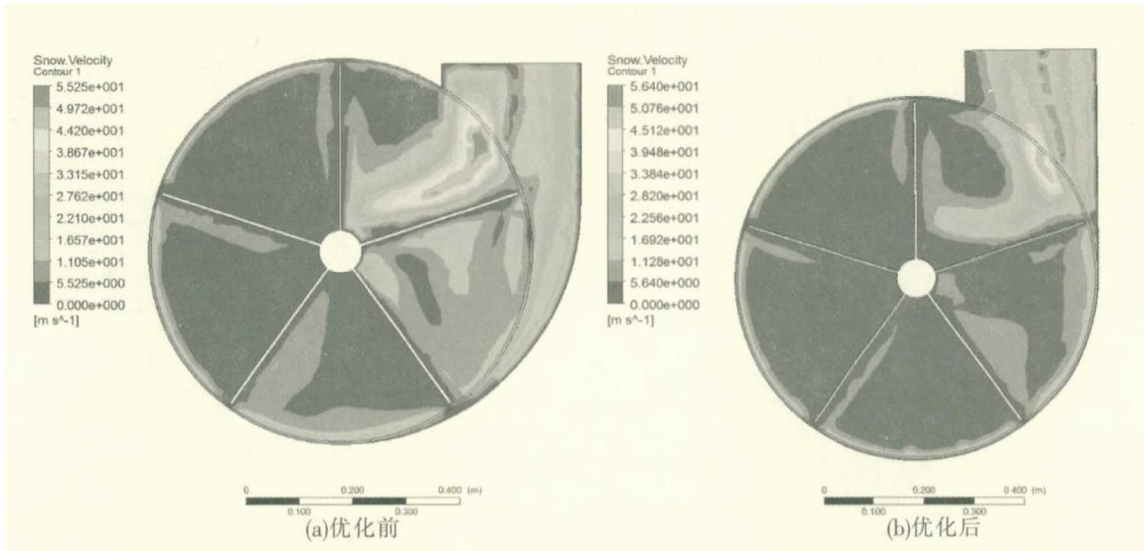


图 10 优化前后雪速度对比云图

由对比图可知,对风机机壳进行优化后,雪的抛出速度明显提高,二次回流现象与涡流现象也明显改善。降低了抛雪过程的速度损失,提高了效率,改善了除雪装置的性能,因此优化后的抛雪风机机壳结构更为合理。

3.2 不同叶片倾角对流场的影响

利用控制变量的方法对不同叶片倾角对流场的影响进行研究,分别研究叶片前倾 10°、无倾角、后倾 10° 3 种状况下风扇内部的气固两相流动情况。3 种状况的气固两相流动雪的速度云图对比如图 11 所示。

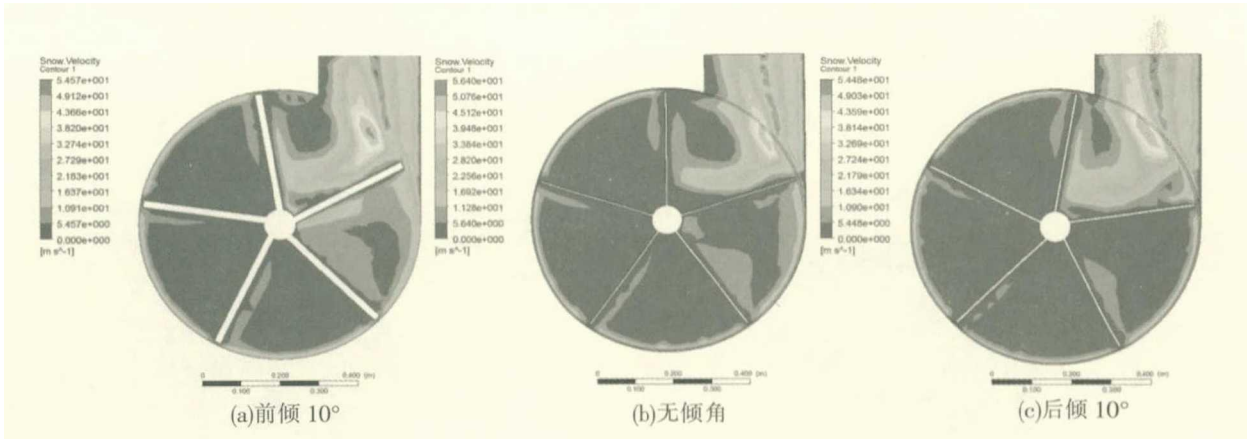


图 11 不同叶片倾角风机内部雪的速度云图对比

由图 11 可知,不同的叶片倾角对雪的抛出速度大小影响不大,对雪的速度分布影响也很小。当叶片左倾 10°或叶片右倾 10°时,都会使风机内部气固两相流动的涡流和回流现象变得更严重,因此,叶片倾角为 0°,即叶片径向安装,风机结构较为合理。

3.3 不同叶片数对流场的影响

保持其他的条件和参数设置不变,分析计算多数风机采用的 3 叶片、4 叶片、5 叶片形式风扇,3 种风机内部气固两相流场活动,得到了 3 种风机的雪速度云图以及雪的体积浓度分布图。其对比图如图 12、图 13 所示。

由图 12 可知,叶片数不同时,对雪的抛出速度有一定的影响,3 叶片与 4 叶片时,雪的抛出速度可达到 37 m/s,当叶片数为 5 时,雪的抛出速度有一定的降低,只有 33 m/s。这是由于 5 叶片时,相邻叶片间

的夹角低于 90° ，当雪脱离扇叶开始抛出时，相邻的扇叶会对气固两相流体向抛雪筒方向的流动产生一定的阻碍效果，降低了雪的抛出速度。3 种叶片风机内部都有涡流和回流现象的产生，4 叶片时涡流产生区域最小，且涡流区域雪的回流速度更低。由图 13 可以看出，当叶片数为 4 时，雪的体积浓度分布更为均匀。综上分析，风扇叶片数为 4 时，风机的结构更为合理。

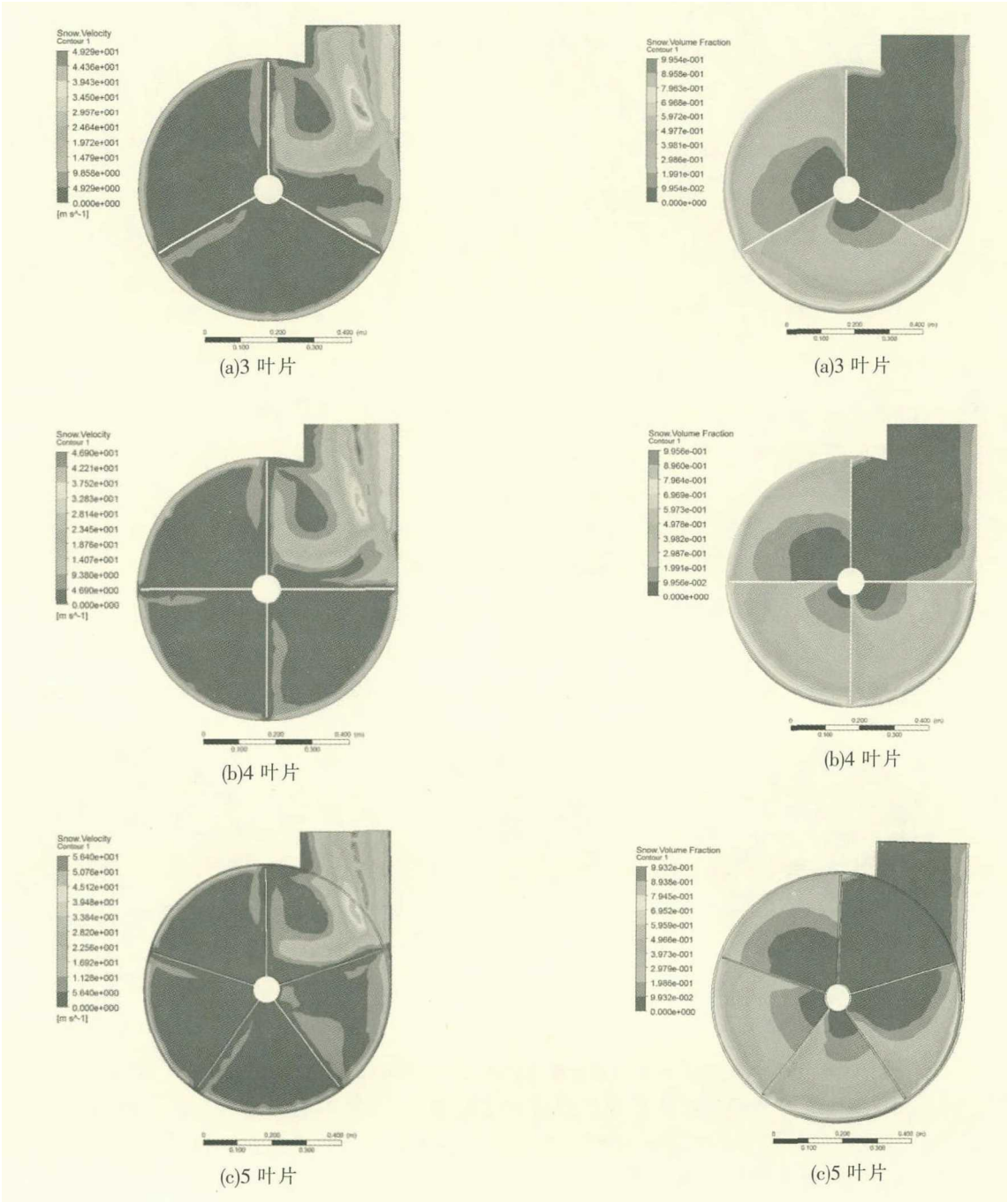


图 12 不同叶片数风机内部雪的速度云图对比

图 13 不同叶片数风机内部雪的体积浓度分布云图对比

4 结论

(1)经除雪车实际应用验证,论文所建立的抛雪风机气固两相流数值模型对风机内部流场进行仿真分析是可行的。

(2)适当的机壳形状有利于改善流场流动状况,当雪的抛出方向平行于抛雪筒即垂直向上时,能够减少雪与风机内壁的摩擦,降低速度和能量损失,提高雪的抛出速度,改善涡流、回流等流动现象。

(3)叶片安装倾角为 0° 时,流场流动的涡流回流现象最少,风机结构更合理。

(4)当叶片数目为4时,流场内部雪的体积浓度分布比3个叶片和5个叶片时更均匀,雪的抛出速度也比较高,涡流回流等流动现象最不明显,更有利于积雪的抛送。

参 考 文 献

- [1]翟之平. 叶片式抛送装置抛送机理研究与参数优化[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.
- [2]姜宝伟. 离心式抛雪头内流场分析及结构优化研究[D]. 大连:大连交通大学,2015.
- [3]刘腾云. 冷吹除雪机气固两相流数值分析[D]. 长春:吉林大学,2012.
- [4]Krzysztof S, Aleksander L. Two-stage motion of particles in the discharge spout of forage harvester[J]. *Agricultural Engineering*, 2010, 124(6): 245-252.
- [5]翟之平, 王春光, 杨忠义. 叶片式抛送装置气流运动仿真与参数优化[J]. *机械科学与技术*, 2010, 29(10): 1352-1356.
- [6]Dennis L. Determination of the air and crop flow behaviour the blowing unit and spout of a pull-type forage harvester [D]. Saskatchewan: University of Saskatchewan, 2005.
- [7]边丽娟. 清雪车抛雪离心风机特性与结构优化研究[D]. 长春:吉林大学,2009.

Numerical Analysis and Structural Optimization of Gas-solid Two-phase Flow Field for Snow Blower

Zheng Mingjun¹, Li Zhangyong¹, Wu Wenjiang²

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Engineering Training Center, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: This study aimed to explore the flow characteristics of the internal flow field during the snow throwing operation of the snow blower, reveal the speed and concentration distribution of the snow under the effect of the flow field, optimize the structure of the fan, and improve the snow throwing performance of the fan. Based on the independently developed dual-purpose snow removal vehicle, a numerical model of the gas-solid two-phase flow in the fan's internal flow field was established using the CFD method, and the fan snow throwing process was simulated. At the same time, the effects of the fan casing shape, the number of fan blades and the blade installation inclination on the gas-solid two-phase flow field and the snow throwing were simulated and compared. The results show that the appropriate casing shape is beneficial to improving the flow. The flow conditions of the field improve the ability to throw snow; when the fan blades are installed with an inclination of 0° and the number of blades is 4, the flow field inside the fan is more conducive to snow throwing and energy loss reduction.

Key words: snow blower; gas-solid two-phase flow; structural optimization