

某环保型烟花机离心风机出风偏离现象的分析与改进

胡靖^{1,2}, 郭雷^{1,2*}, 罗永新^{1,2}, 杨汉键^{1,2}, 何祥华^{1,2}

¹怀化学院物电与智能制造学院, 湖南 怀化

²怀化学院武陵山片区生态农业智能控制技术湖南省重点实验室, 湖南 怀化

收稿日期: 2022年12月28日; 录用日期: 2023年1月30日; 发布日期: 2023年2月6日

摘要

针对环保型烟花机喷花量小、喷花高度不够以及喷花分散等问题, 通过CFD数值模拟的方法对其送风系统的流动特性进行了分析与改进, 发现离心风机因离心力导致的偏离风现象是导致喷花效果不佳的重要原因, 因此提出了一种新结构来减小离心风机的出风偏离现象, 最后通过喷花实验对新结构的有效性进行了验证。结果表明: 离心风机的偏离风是导致喷花效果差的重要原因, 所提出的新结构不仅降低了离心风机管道内以及出口位置风的偏离度, 而且还可增大氧气与燃料的混合度与消除管道内部涡流现象, 最终改善喷花效果; 从数值上来看, 新结构的出口最大风速的偏离度降低了约70%, 最后还给出了风机转速不会改变出口速度分布梯度的形状但是会非线性的增大出口最大动压这一结论; 这为以后类似的使用场景提供了参考。

关键词

烟花机, 离心风机, 管道, 改进, 数值模拟, 实验

Analysis and Improvement of Centrifugal Fan Deviation in Environment Protecting Fireworks Machine

Jing Hu^{1,2}, Lei Guo^{1,2*}, Yongxin Luo^{1,2}, Hanjian Yang^{1,2}, Xianghua He^{1,2}

¹School of Physics, Electronics and Intelligent Manufacturing, Huaihua University, Huaihua Hunan

²Key Laboratory of Intelligent Control Technology for Wuling-Mountain Ecological Agriculture in Hunan Province, Huaihua University, Huaihua Hunan

Received: Dec. 28th, 2022; accepted: Jan. 30th, 2023; published: Feb. 6th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 胡靖, 郭雷, 罗永新, 杨汉键, 何祥华. 某环保型烟花机离心风机出风偏离现象的分析与改进[J]. 机械工程与技术, 2023, 12(1): 9-19. DOI: 10.12677/met.2023.121002

Abstract

Aiming at the problems such as small spray quantity, insufficient spray height and scattered spray of environment-friendly fireworks machine, the flow characteristics of its air supply system were analyzed and improved by CFD numerical simulation. It was found that the deviation of centrifugal fan caused by centrifugal force was an important reason for the poor spray effect. Therefore, a new structure is proposed to reduce the deviation of centrifugal fan. Finally, the effectiveness of the new structure is verified by spray experiment. The results show that the deviation of the centrifugal fan is an important reason for the poor spraying effect. The proposed new structure not only reduces the deviation of the wind in the centrifugal fan pipeline and at the outlet position, but also increases the mixing degree of oxygen and fuel and eliminates the vortex phenomenon in the pipeline, and finally improves the spraying effect. From the numerical point of view, the deviation degree of the maximum wind speed at the outlet of the new structure is reduced by about 70%. Finally, it is concluded that the fan speed does not change the of the outlet velocity distribution gradient, but increases the maximum dynamic pressure at the outlet nonlinearly. This provides a reference for similar usage scenarios in the future.

Keywords

Fireworks Machine, Centrifugal Fan, Pipeline, Improvement, Numerical Simulation, Experiment

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

离心风机因其具有能耗低、效率高、安装简单、维护方便等特点广泛应用于包括工厂、隧道、医药、制造、石油化工、环保机械以及电子电力等行业，同样在环保型烟花机领域也有巨大的应用需求。在环保型烟花机领域，瀑布机是其中最常见的一种(如图 1 所示)，大量应用于大型活动场所比如舞台等场合。作为极其关键的零部件，离心风机送风系统不仅承担着吸附空气与燃料的作用，而且还是烟花机获得一定喷花高度力的来源；但环保型瀑布机在行业内一直存在着喷花散、花小与喷花高度不够等难题，因此对离心风机送风系统进行深入研究找出问题并提出对应的解决措施就显得非常迫切。

环保型烟花机烟花产生的工作原理是：首先预热燃料(铝粉)，其次将预热后的燃料在自重与管道吸力的作用下送入管道内与空气进行混合并剧烈燃烧而产生烟花，最后通过离心风机的高速出风将烟花喷出。近年来，随着计算机以及测试仪器性能的提升，国内外学者针对离心风机的研究日益增多[1]-[22]，他们的工作主要是通过实验或者数值模拟或者两者结合的方法对离心风机的内部结构比如叶片形状等进行改进，以此减小气流压力损失以及气动噪声。然而针对而对离心风机出风偏离现象对下游执行机构比如对环保型烟花机的喷花效果带来的影响目前鲜有文献报道，因此有必要对离心风机出风偏离现象进行深入分析并提出解决措施。

本文首先利用 CFD 数值仿真对原方案的离心风机 - 喷花流道的内部流动特性进行了计算分析，发现了风机出风偏离现象对喷花产生的不利影响，然后根据原方案的计算结果设计了一种偏离风的调整结构，并通过喷花实验对该结构的可行性进行了验证。

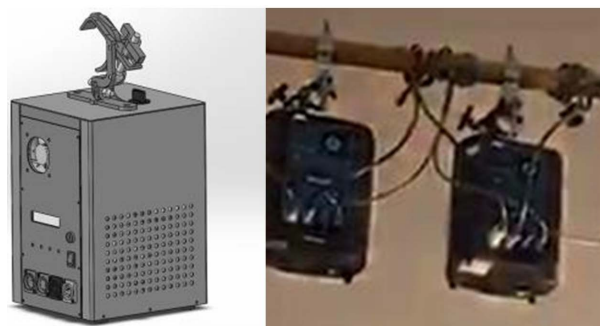


Figure 1. An environmental protection fireworks machine
图 1. 某环保型烟花机

2. 模型的建立

如图 2(a)所示为烟花机送风系统的原方案,其主要由离心风机和送风管道组成,材料为普通的 PTFE 材料;图 2(b)为改进方案,其组成结构和原方案类似,只是送风管道由三部分组成,即左侧核心区、中间转弯区与上面出口区;改进方案的具体工作原理如下:离心风机因离心力的作用使得出口最大速度偏离中心且在管道底端区域,此外送风管道的核心区上部 and 底部位置均开有近似对称分布且大小相等的小孔,上部的孔用来吸附燃料,而底部的孔用来补气与调整离心风机出口偏离风的偏离度,空气从补气孔进入后一方面可以可提供更多的空气进行助燃,另一方面还可调整离心风机的偏离风的偏离程度,还可使燃料与空气充分混合燃烧进而产生更多的烟花,此外因偏离风得以调中使得燃烧发生在管中远离管壁的区域,再加上弯管内壁涂耐高温涂层,这样可大大减少对管内壁的烧蚀。图 3 表示原方案和改进两种方案的流体三维模型。

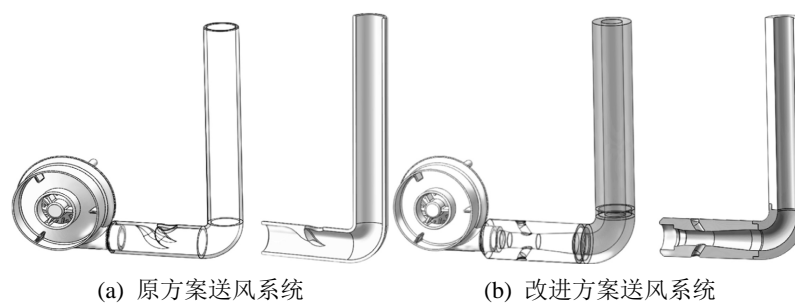


Figure 2. Three dimensional model of two schemes
图 2. 两种方案三维模型

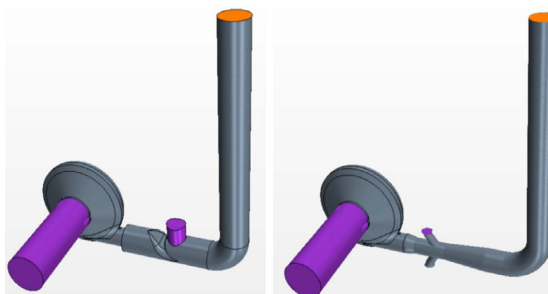


Figure 3. Three dimensional fluid model of two schemes
图 3. 两种方案流体三维模型

3. 模型的前处理

3.1. 网格

将两种方案的流体模型导入流体仿真软件中, 采用多面体网格对其进行网格划分, 并且以出口动压值为评定对象对网格无关性进行了验证, 图 4 所示表示出口动压与网格数的关系。

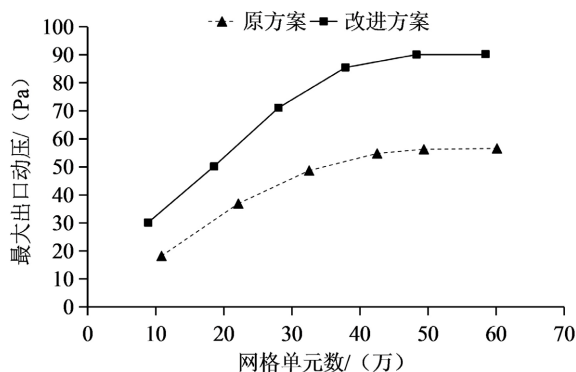


Figure 4. Grid independence verification

图 4. 网格无关性验证

由图 4 可知当原方案和改进方案的网格单元数大于 44 万时对结果影响不明显, 考虑到计算精度和效率, 后续分析的网格单元选择如下: 原方案的网格模型共划分有 493,853 个多面体单元(如图 5(a)所示), 改进方案的网格模型共划分有 442,964 个多面体单元(如图 5(b)所示)。



Figure 5. Two scheme mesh models

图 5. 两种方案网格模型

3.2. 边界条件

模型的主要边界条件如下[12]: 1) 风机的入口、燃料的入口以及入风口均设为压力进口边界, 压力为 0 Pa; 2) 喷花管出口为压力出口边界, 压力为 0; 3) 旋转区域包含有风机叶片的区域, 其采用 MRF (moving reference frame)模型且转速 $N = 10,000$ rpm (可调整); 4) 除中间核心段为动域之外的其他区域均设为静域; 5) 动域和静域的公共面设为 interface 面; 6) 未定义的其他面均设为无滑移壁面。此外采用的湍流模型为标准的 K- ϵ 模型。

主要的假设条件主要有: 1) 空气不可压缩; 2) 不考虑管壁内摩擦。

4. 计算结果与分析

4.1. 速度对比与分析

图 6 给出了风机转速 $N = 10,000$ rpm 时的原方案和改进方案出口速度分布图。

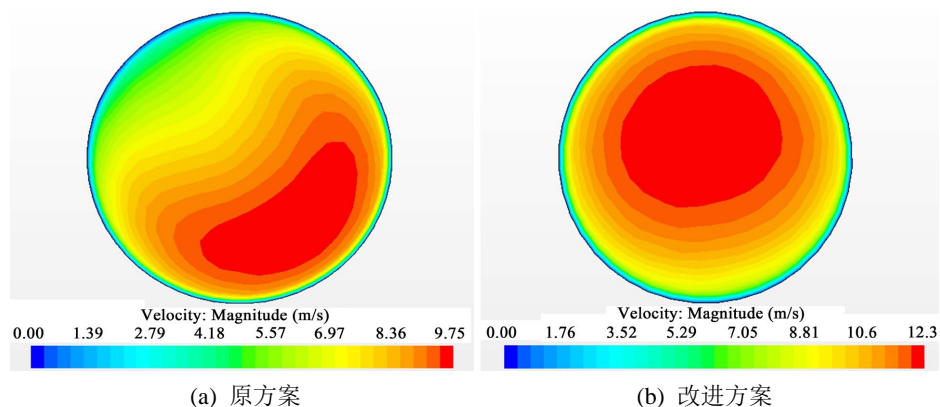


Figure 6. Outlet velocity distribution ($N = 10,000$ rpm)

图 6. 出口速度分布($N = 10,000$ rpm)

由图 6 可知：改进方案出口最大速度为 12.3 m/s，相比较原方案的 9.75 m/s 提升了近 25%，这为提升喷花高度提供了基础。此外从速度分布来看，改进方案的最大速度区域较原方案而言明显居中且范围较大，证明离心风机出风偏离现象得到有效改善，这为解决喷花分散的问题提供了可能。

图 7 和图 8 分别表示离心风机在转速 $N = 10,000$ rpm 时下游喷花管道核心区的速度矢量分布和速度大小分布。

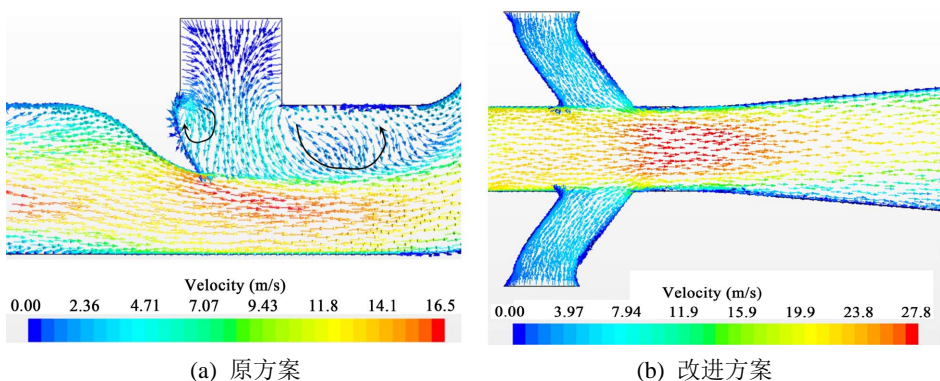


Figure 7. Velocity vector distribution in the core region ($N = 10,000$ rpm)

图 7. 核心区速度矢量分布($N = 10,000$ rpm)

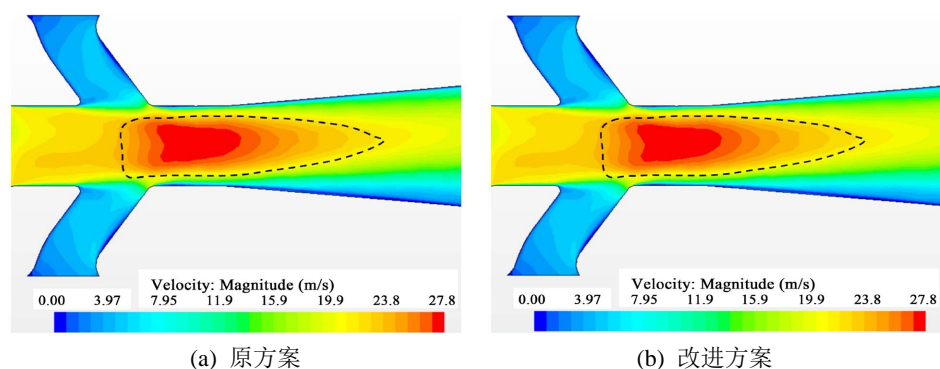


Figure 8. Velocity size distribution in the core region ($N = 10,000$ rpm)

图 8. 核心区速度大小分布($N = 10,000$ rpm)

由图 7 和图 8 可知：原方案的核心区存在涡流现象，这不仅会增大燃料颗粒在管道内的驻留时间，而且还会增大管道空气流的能量损失，最终影响喷花效果；相比较原方案而言，改进方案管道内的涡流则完全被消除。根据“文丘里原理”可知[23] [24] [25] [26] [27]：中间流速越大两侧吸力也会越强。从数值上来看，改进方案的最大速度为 27.8 m/s，高于原方案的 16.5 m/s，速度提升了近 70%，因此改进方案的吸附能力得到明显提升，这不仅有助于增大管道内部空气量，还能使燃料与空气混合更加充分，最终于改善喷花效果。

为了说明核心区下端孔对偏离风具有调整作用，对比分析了下端开孔和不开孔时核心区的速度分布，具体如图 9 所示。

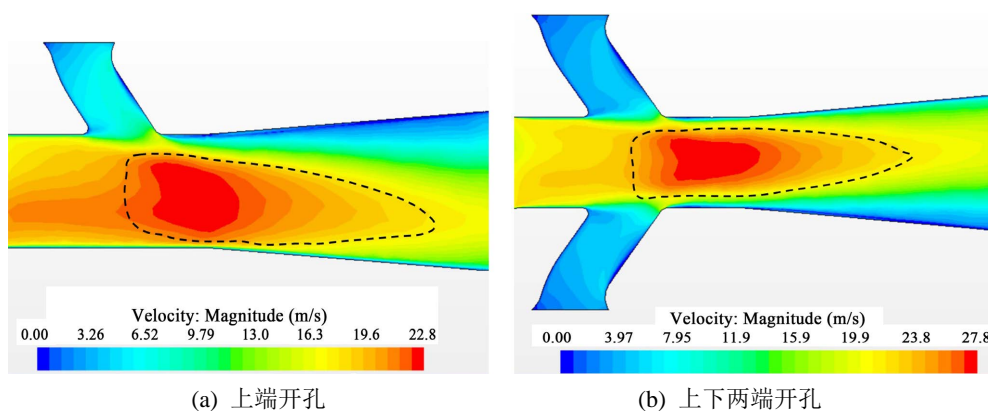


Figure 9. Velocity size distribution corresponding to different openings in the core region (N = 10,000 rpm)

图 9. 核心区不同开孔对应的速度大小分布(N = 10,000 rpm)

由图 9 可知：核心区管道下端开孔可以明显减弱出口最大速度的偏离现象，计算证明只要下端开孔合适就能最大程度的减弱离心风机出风偏离的现象，这为改善喷花分散问题提供了技术可能，本文建议核心区上下两口大小相等且对称分布。

4.2. 出口最大速度偏离度的对比与分析

为了说明改进方案对离心风机出口偏离风的调整效果以及消除出口直径因素的影响，引入了最大速度偏离度的概念，令偏离度为 ε 。

$$\varepsilon = c/r$$

式中： ε ——最大速度偏离度， c ——最大速度偏心距， r ——出口半径。最大速度偏心距是最大速区域的中心位置到出口中心的距离，具体说明如图 10 所示。

下图 11 给出了风机转速为 N = 10,000 rpm 与 N = 12,000 rpm 时原方案与改进方案最大速度偏心距的对比。

由图 11 可知：出口速度梯度分布形状和最大速度偏心距均与离心风机的转速无关，此外改进方案中最大速度区域至少是原方案的两倍，这都有利于改善喷花效果。从数据上来说，改进方案中出口最大速度偏心距 $c = 1.06$ mm (出口半径 $r = 7$ mm)，原方案的 4.78 mm (出口半径 $r = 8.75$ mm)由此可知：改进方案最大速度偏离度 $\varepsilon = 0.15$ ，较原方案的 0.55 提升了约 73%。因此出风偏离现象改善明显，这说明了改进方案理论上可以解决喷花分散的问题。

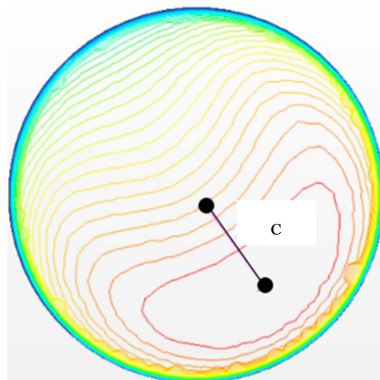


Figure 10. Velocity eccentricity diagram
图 10. 速度偏心距示意图

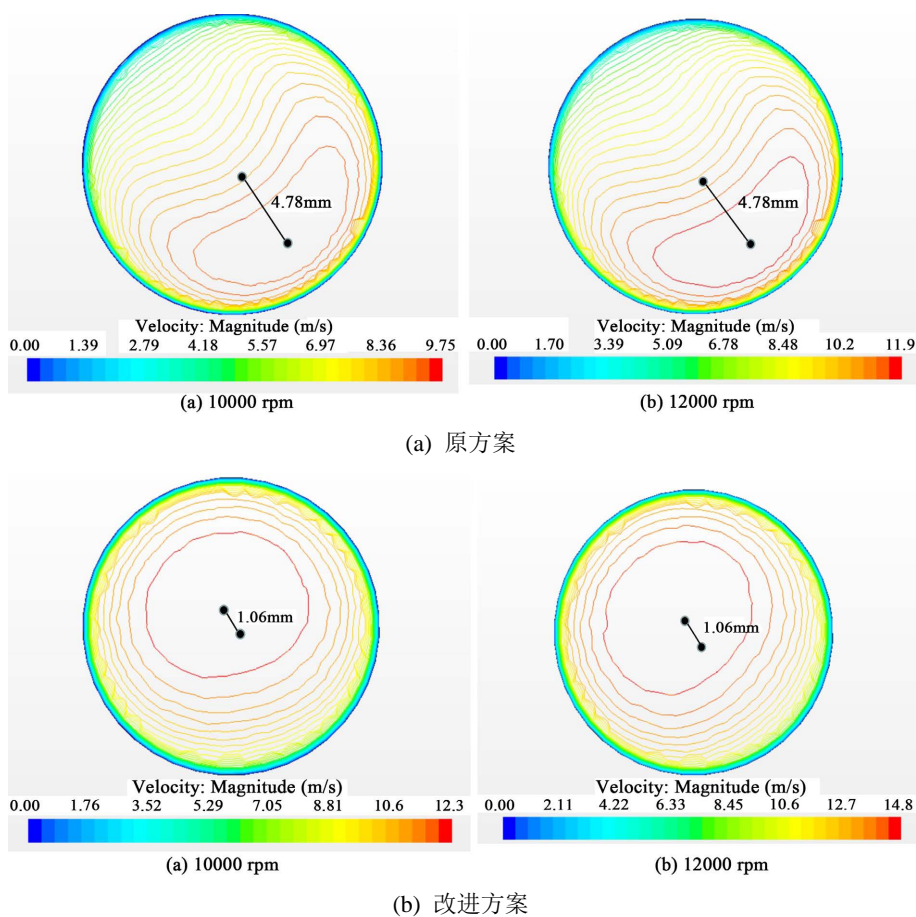


Figure 11. Eccentricity of maximum velocity at the exit of two schemes
图 11. 两种方案出口最大速度的偏心距

4.3. 出口动压的对比与分析

为了描述改进方案可以改善喷花高度不够的问题，提取了出口动压值进行了说明。根据伯努利方程可知：动压越大意味着速度越高，那么喷花高度理论上也会越大。

下图 12 给出了风机转速为 $N = 10000 \text{ rpm}$ 时原方案与改进方案出口动压的对比。

由图 12 可知：风机转速相同时，改进方案的出口动压最大值为 90.1 Pa，较原方案 56.3 Pa 提升了近 60%，原因主要有以下两个：一个是管内径从原方案的 $d = 17.5 \text{ mm}$ 降低到了 $d = 14 \text{ mm}$ ，出口面积下降了近 36%；另一个是改进方案管道内部涡流的消除降低了能量损耗。

为了更清晰的说明离心风机转速与出口动压的关系，下表 1 给出了原方案和改进方案在转速 $N = 5000 \sim 15000 \text{ rpm}$ 时出口最大动压数据，图 13 给出了相应的对比图。

Table 1. The maximum outlet dynamic pressure of the two schemes under different fan speeds

表 1. 两方案在不同风机转速下出口最大动压值

参数	出口最大动压(Pa)		
	原方案	改进方案	增幅
5000	13.1	21.2	61.83%
6000	19.1	31.2	63.35%
7000	26.4	43.1	63.26%
8000	35.0	56.9	62.57%
9000	45.0	72.7	61.56%
10,000	56.3	90.1	60.04%
11,000	69.2	108.9	57.37%
12,000	83.4	129.3	55.04%
13,000	98.6	151.4	53.55%
14,000	115.0	175.3	52.43%
15,000	132.5	199.6	50.64%

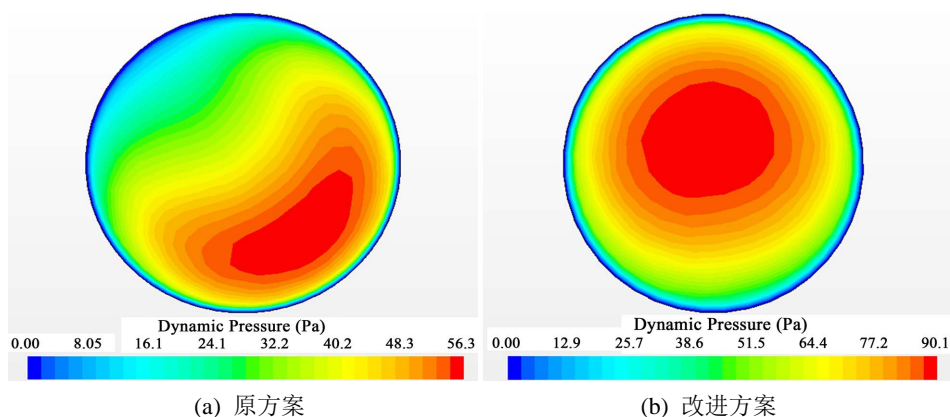


Figure 12. Outlet dynamic pressure distribution ($N = 10,000 \text{ rpm}$)

图 12. 出口动压分布($N = 10,000 \text{ rpm}$)

由表 1 和图 13 可知：随着风机转速的增加，原方案和改进方案出口最大动压均非线性递增，这是因为随着风机转速的增大管道内部空气流速也会增加，这样动压也会增大；此外还可以看出改进方案出口最大动压值的增幅较原方案也要大，究其原因动压值的最大由于风扇转速的增加导致的，而动压增幅的增加主要是因为改进方案中管道内部没有涡流，因此不需要克服涡流带来的能量损失。

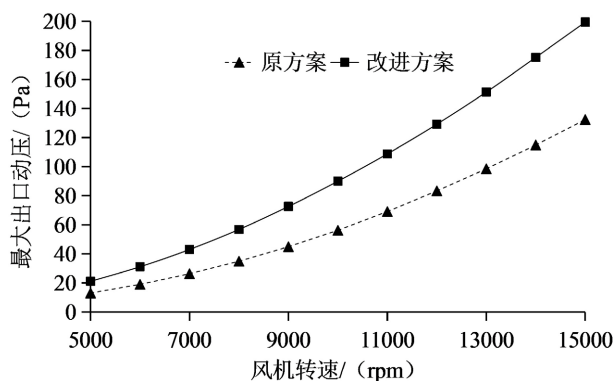


Figure 13. Comparison of maximum outlet dynamic pressure between the two schemes under different fan speeds

图 13. 两方案在不同风机转速下出口最大动压对比

5. 实验验证

前面已经对改进方案与原方案进行了对比分析, 相比较原方案而言, 改进方案理论上存在以下特点:

- 1) 新结构的核心区射流速度提升导致从外界的吸附力的增强, 这样一方面可以增大管道内空气的含量, 另一方面还能增强燃料与空气的混合效果, 进而燃烧也会更充分, 这为解决花小问题提供了解决方案;
- 2) 下端开孔不仅可以补气还能很好的降低离心风机出风的偏离度, 这为解决花散问题提供了解决方案;
- 3) 出口动压的提升可以有效解决喷花高度不够的问题。因此从理论上来说改进方案可以解决环保型瀑布机存在的喷花小、喷花散喷花高度不够的问题, 但是还需要实验验证。

下面通过对原方案和改进方案分别进行实验来对喷花效果进行验证, 图 14 给出了实验对比情况, 图 14(a)为原方案的实测图, 图 14(b)为改进方案的实测图。

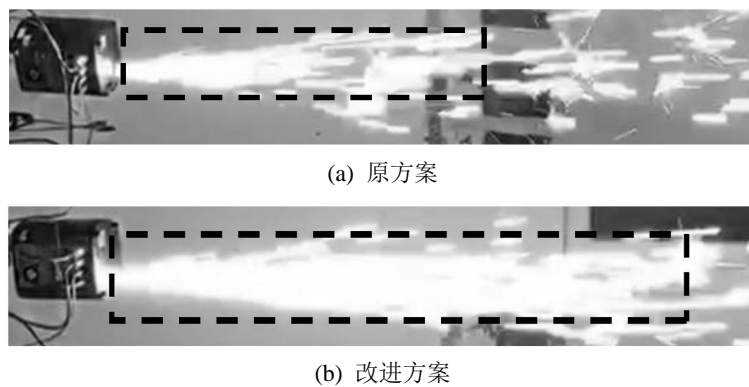


Figure 14. Comparison of spray experiment between original scheme and improved scheme

图 14. 原方案与改进方案喷花实验对比

由图 14 可知: 改进方案喷花效果得到明显改善, 改进方案中的喷花高度提升了近 50%, 喷花量提升了至少 1 倍, 此外还可以看出喷花更加集中, 这都证明了改进方案的有效性与可行性。

6. 结论

本文通过 CFD 数值模拟的方法对环保型烟花机的离心风机出风偏离现象进行计算分析并提出了改进措施, 最后通过实验验证了改进方案能有效地提升喷花效果。具体结论如下:

- 1) 通过实验对比验证了改进方案的有效性,这也间接的说明了离心风机出风偏离现象是导致喷花效果差的重要原因;
- 2) 改进方案中的送风系统核心段下端开孔可以有效抑制出风偏离现象,从数值上来看出口最大风速的偏离度降低了约 70%,此外还能增大氧气与燃料的混合程度和消除涡流现象,并最终解决喷花花散以及花小等问题;
- 3) 风机转速不会改变出口速度分布梯度的形状但是会非线性的增大出口最大动压;
- 4) 文中提出的离心风机出口偏离风调整结构为以后类似的设计提供了参考。

基金项目

湖南省教育厅一般项目(20C1494)、武陵山片区生态农业智能控制技术湖南省重点实验室项目(ZNKZN2019-5)。

参考文献

- [1] Crompton, P. and Wu, Y. (2005) Energy Consumption in China: Past Trends and Future Directions. *Energy Economics*, **27**, 195-208. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2004.10.006>
- [2] Zhao, D.F. and You, X.Y. (2019) Numerical Investigation of Grease Separation of Multi-Blades Centrifugal Fan with Inner Guides. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **330**, Article ID: 042007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/330/4/042007>
- [3] Zhang, X.L., Zhang, Y.L. and Lu, C.G. (2020) Flow and Noise Characteristics of Centrifugal Fan in Low Pressure Environment. *Processes*, **8**, 985. <https://doi.org/10.3390/pr8080985>
- [4] Li, D.J. (2020) Numerical Simulation of Internal Flow Field of Centrifugal Fan for Clearing and Selecting Grain Harvester. *Journal of Engineering Mechanics and Machinery*, **5**, 12-18.
- [5] Zhang, Y.F. and Dou, H.-S. (2020) Effect of Blade Profile on the Performance of a Centrifugal Fan with Different Velocity Distribution Functions: Review Papers. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, **13**, 623-634. <https://doi.org/10.5293/IJFMS.2020.13.3.623>
- [6] Andrii, Z., Kostiantyn, B., Pavlo, K., et al. (2021) Materials Selection and Design Options Analysis for a Centrifugal Fan Impeller in a Horizontal Conveyor Dryer. *Materials*, **14**, 6696. <https://doi.org/10.3390/ma14216696>
- [7] Cai, J.C., et al. (2021) Study of the Hydrodynamic Unsteady Flow inside a Centrifugal Fan and Its Downstream Pipe Using Detached Eddy Simulation. *Sustainability*, **13**, 5113. <https://doi.org/10.3390/su13095113>
- [8] Liu, Z.F., Yang, H., He, H.J., et al. (2022) Flow Instability in a Volute-Free Centrifugal Fan Subjected to Non-Axisymmetric Pre-Swirl Flow from Upstream Bended Inflow Tube. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, **236**, 689-713. <https://doi.org/10.1177/09576509211062664>
- [9] Zhang, H.J., Wang, Z.D., Yang, H., et al. (2022) Blade Shape Optimization and Internal-Flow Characteristics of the Backward Non-Volute Centrifugal Fan. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, **236**, 673-688. <https://doi.org/10.1177/09576509211052728>
- [10] Lv, H.Z., Yang, W.Z. and Zhang, W.J. (2022) Numerical Simulation and Analysis of the Aerodynamic Noise of a Nautilus-Inspired Bionic Multiblade Centrifugal Fan. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **36**, 4475-4489. <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0812-4>
- [11] 王嘉冰, 区颖达. 集流器结构对多翼离心风机性能的影响[J]. 流体机械, 2004, 32(10): 22-25.
- [12] 邵卫, 李意民, 贾利红. 离心风机内部流场模拟[J]. 煤矿机械, 2006, 27(7): 47-48.
- [13] 王松岭, 张磊, 杨阳, 等. 基于有限体积法的 G4-73 型离心风机三维流场数值模拟[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(4): 38-41.
- [14] 赵征, 李彬, 李小辉, 等. 叶片数对高比转速离心风机气动性能和噪声影响的分析[J]. 流体机械, 2020, 48(11): 48-52+57.
- [15] 蒋博彦, 肖千豪, 杨筱沛, 等. 多翼离心风机蜗壳小型化设计数值研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(9): 175-182.
- [16] 邬长乐, 陈二云, 杨爱玲, 等. 仿生叶片在离心风机上应用的数值分析[J]. 动力工程学报, 2021, 41(4): 301-308.
- [17] 刘阳, 许子倩, 张义云, 等. S 型仿生叶片对可逆多翼离心风机气动性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(11): 2841-2848.

-
- [18] 孟永哲, 许子倩, 刘小民. 多翼离心风机模化设计中叶轮-蜗壳的匹配性研究[J]. 风机技术, 2022, 64(3): 10-16.
- [19] 李晓明, 李俊杰, 欧阳峥嵘, 等. 低温氦气离心风机气动设计及变工况性能预测[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(7): 1845-1851.
- [20] 王加浩, 龚东巧, 刘小民, 等. 采用仿鲤科鱼C型启动构型叶片的多翼离心风机气动性能研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(9): 57-68.
- [21] 刘阳, 刘小民, 陈宗华, 等. 多翼离心风机分组优化设计对风机盘管整机气动性能的影响研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(7): 156-167.
- [22] 王加浩, 刘小民, 田晨晔, 等. 多翼离心风机双圆弧叶片的参数优化设计及气动性能分析[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(3): 94-104.
- [23] 周俊杰, 宋煜晨, 王德忠, 等. 文丘里管空化限流现象数值模拟和实验研究[J]. 核动力工程, 2021, 42(3): 25-31.
- [24] 张兴凯, 王艺蓓, 刘明, 等. 可调式临界流文丘里喷嘴流动特性试验研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2022, 19(2): 97-104.
- [25] 李建龙, 林子捷, 陈源正, 等. 文丘里喷嘴改进除尘滤筒对撞脉喷清灰性能的数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1558-1565.
- [26] 汤子菡, 董龙飞, 吴晓, 等. 气液两相流在文丘里管内的流动压降特性研究[J]. 山东化工, 2021, 50(13): 169-171.
- [27] 丁国栋, 陈家庆, 李振林, 等. 注气孔位置对文丘里管式微气泡发生器成泡特性的影响分析[J]. 化工学报, 2021, 72(11): 5552-5562.