

# Effects of the Size on the Flow Behaviors and Characteristics of the Converging Duct

Yanglin Cheng<sup>1</sup>, Jianjun Ye<sup>1,2\*</sup>, Xiaohong Huang<sup>3</sup>, Yuan Zhang<sup>1</sup>, Shehab Salem<sup>1</sup>,  
Yiwen Wang<sup>1</sup>, Zhengyang Li<sup>1</sup>, Yuji Yang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Power and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Key Laboratory of Low-Grade Energy Utilization Technologies & Systems, MOE, Chongqing University, Chongqing

<sup>3</sup>Institute of New Energy, Wuhan Hubei

Email: <sup>\*</sup>hustyj@hust.edu.cn

Received: Jan. 10<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jan. 24<sup>th</sup>, 2019; published: Feb. 2<sup>nd</sup>, 2019

---

## Abstract

The efficiency of the converging duct is closely related to the size. In the paper, the numerical simulation is implemented to study the performance of the converging duct, combining with the experiment test. The flow characteristic, such as the velocity distribution and the pressure distribution, are investigated respectively. The results present that there is a critical size for the converging duct. When the duct size is lower than the critical size, the size effect is obvious, and the efficiency of the converging effect will decrease as the duct size decreases. When the duct size is higher than the critical size, the change of the converging efficiency slows down.

## Keywords

Low Speed Wind, Converging Duct, Size Effect, Concentration Characteristic

---

# 尺寸效应对聚风型风筒流场特性的影响研究

程阳林<sup>1</sup>, 叶建军<sup>1,2\*</sup>, 黄晓宏<sup>3</sup>, 张 缘<sup>1</sup>, Shehab Salem<sup>1</sup>, 汪依文<sup>1</sup>, 李正扬<sup>1</sup>, 杨宇吉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉

<sup>2</sup>重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆

<sup>3</sup>武汉新能源研究院有限公司, 湖北 武汉

Email: <sup>\*</sup>hustyj@hust.edu.cn

收稿日期: 2019年1月10日; 录用日期: 2019年1月24日; 发布日期: 2019年2月2日

---

<sup>\*</sup>通讯作者。

文章引用: 程阳林, 叶建军, 黄晓宏, 张缘, Shehab Salem, 汪依文, 李正扬, 杨宇吉. 尺寸效应对聚风型风筒流场特性的影响研究[J]. 流体动力学, 2019, 7(1): 31-37. DOI: 10.12677/ijfd.2019.71004

## 摘要

聚风型风筒的聚风效率与装置尺寸密切相关。本文基于数值仿真方法,结合实验验证,对不同尺寸的聚风装置的速度分布、压力分布等流场特性进行了研究,表明聚风装置的尺寸在低于某临界值时,聚风效率会随着装置尺寸的减小急剧下降;而高于该值时聚风效率变化缓慢。

## 关键词

低风速, 聚风筒, 尺寸效应, 汇聚特性, 流场分布

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

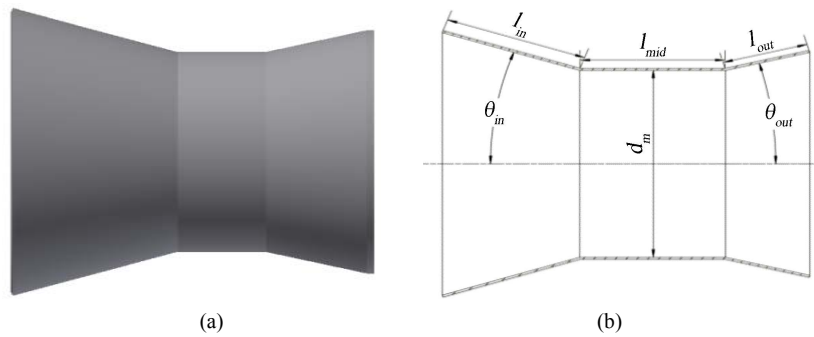
近年来,随着国民经济的快速发展,整个社会对能源的需求量正在急剧上升,然而对于我国来说,传统化石能源不论是从可持续性以及环境角度,均已经难以满足社会发展的要求,发展新能源已逐步成为能源发展的重要目标。在风电行业,我国的大型风电场大多位于“三北”地区,这给基础建设、电力输送、监控管理以及运行维护都带来相当的难度,对于中东部以及南部等人口密集地区,经济基础好,能源及电力需求量大,风能密度普遍不高,年平均风速大多数处于低风速环境,如何高效利用低品位风能进行发电,得到人们越来越广泛的重视。

在低品位风能的高效利用方面,张臣等人通过对渐缩型聚风装置的研究,探索了渐缩型风筒对于微风汇聚的积极作用[1];田德等人对渐缩-渐扩型聚风筒进行了相关实验研究,提出一种聚风型风筒的方法,对风能进行浓缩,达到了聚风提速的效果[2][3][4][5];大屋裕二与张兴联合研制了紧凑型聚风发电装置,利用出口处的负压抽吸作用对聚风筒风能进行提速,表明渐扩型聚风筒有着优秀的聚风能力[6][7]。在对低品位风能聚风型风筒的研究过程中,本研究团队注意到风筒的尺寸对于风机的效率有着较大影响,且不同的模型尺寸对模型聚风能力的影响程度也各不相同。因此,本文基于CFD数值模拟仿真方法[8],采用参数化设计与实验研究相结合的方式,针对聚风筒尺寸效应对于低品位聚风效果的影响规律以及变化趋势进行了重点研究。

## 2. 物理模型

本文研究的对象为聚风筒模型,如图1(a)和图1(b)所示,该模型主要由三段构成,前端为收缩管型进口,后端为扩张管型出口,中间为直筒状喉口。前端收缩管长度为 $l_m$ ,进口张角为 $\theta_m$ ;后端扩张管长度为 $l_{out}$ ,出口张角为 $\theta_{out}$ ;中间喉口段长度 $l_{mid}$ ,喉口段直径为 $d_m$ 。

采用控制变量的方法,主要研究尺寸变化对聚风筒聚风效率的影响规律。文中选择喉口直径为500 mm的模型作为参照模型,并设置喉口直径分别为800 mm, 1200 mm, 1600 mm模型作为放大实验对照组,设置喉口直径为300 mm, 200 mm, 100 mm, 50 mm的模型作为缩小实验对照组,各组对照模型以其喉口直径大小为依据,等比例进行缩放。



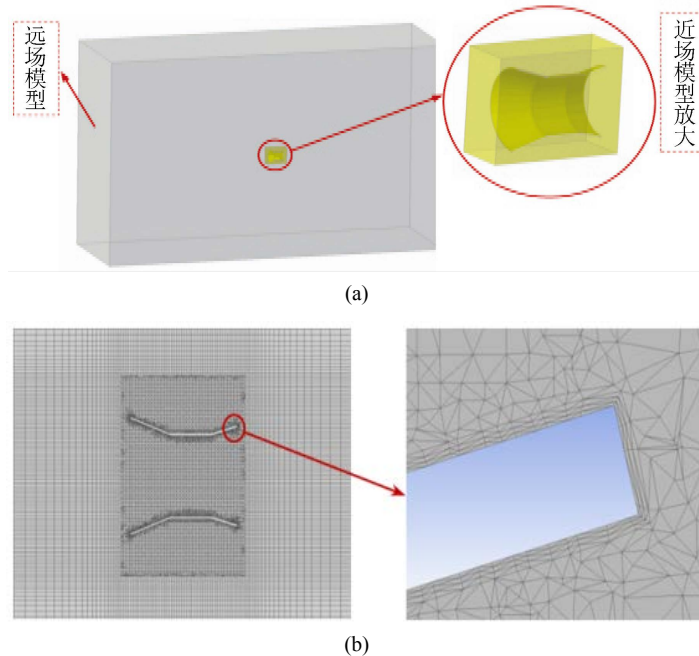
**Figure 1.** Three-dimensional model and structural parameters. (a) Three-dimensional model; (b) Structural parameters

**图 1.** 三维模型及结构参数。(a) 三维模型；(b) 结构参数

### 3. 聚风筒数值仿真模型及实验验证

#### 3.1. 数值仿真模型

本文采用全流场数值模拟的方法，对聚风筒的内流场运动规律及外流场运动规律进行研究。为提高计算精度同时降低网格总数，文中采用远场模型与近场模型相配合形成混合结构的数值计算模型，如图 2(a)所示。远场模型为大长方体流体域，并且宽度和高度在尺寸上均高于风筒最大直径的 10 倍，而长度方面则高于风筒总长的 20 倍[7]。



**Figure 2.** Full flow field model and mesh generation of the air duct. (a) Numerical simulation model; (b) Mesh generation

**图 2.** 聚风筒全流场模型及模型网格剖面图。(a) 数值计算模型；(b) 网格划分

在网格划分方法上，近场模型采用非结构化网格的方式进行划分，并在近壁面处生成 3 层结构化三棱柱网格[7]，如图 2(b)所示。模型的远场采用结构化网格进行划分，控制各个位置的网格疏密度，使得

内部网格密度较大,越靠近边缘网格密度越小。采用混合网格的方式将结构化远场模型与非结构化近场模型进行连接,获得整体网格数 663 万。

### 3.2. 实验测试系统及数值结果验证

将上述对照实验中的参照模型(喉口直径 500 mm)按照 1:1 大小做出实物模型,并依据实验要求放置于实验风场中,具体实物模型与测试方法如下图 3 所示。对风洞出口进行风场区域量化,选择该风洞出口处面平均风速最接近 3 m/s 的位置,进行实验测试工作,经测算实验风场的平均风速为 2.45 m/s。



Figure 3. Test system of the air duct  
图 3. 聚风筒实验测试系统

按照上述数值模拟方法进行仿真计算,为表征流体沿流线的速度分布规律,数值仿真的采点方法为沿着垂直于轴线方向等间距采点,如图 4(a)所示。针对参照模型(喉口直径 500 mm)各测点位置按照来流风速为 2.45 m/s 进行测试,分别进行实验测试和数值仿真,得到喉口处的风速值,如图 4(b)所示,结果显示,各个测点处数值仿真结果与实验测试结果有较好的吻合度,表明本文构建的聚风筒数值模型的有效性。另外,对仿真模型喉口处的风速值取加权平均,可知在来流风速为 2.45 m/s 时,模型的喉口平均风速达到 3.26 m/s,其喉口处平均风速相对于来流风速值提升了 33%,这说明本文提出的聚风筒模型具有明显的低风速风能汇聚效果。

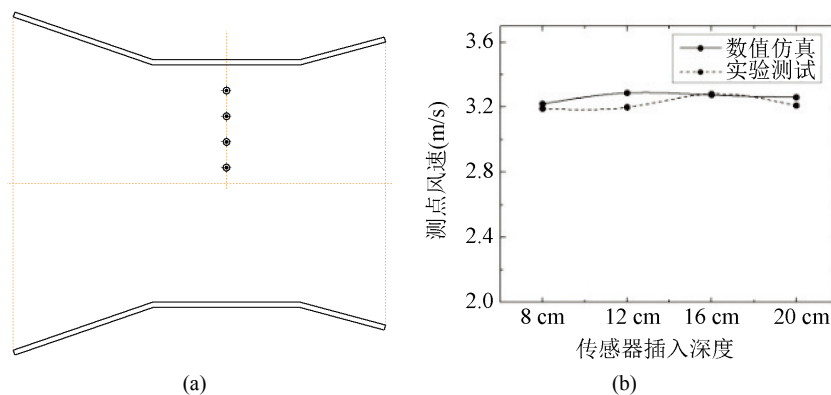


Figure 4. Location of different measuring points and wind speed value curves. (a) Location of measuring points; (b) Wind speed value curves

图 4. 不同测点位置及风速分布曲线。(a) 测点位置; (b) 风速值曲线

#### 4. 聚风筒尺寸效应计算结果及分析

图 5 和图 6 分别为不同尺寸下的聚风筒速度云图和压力云图。分析可得, 在模型喉口直径不低于 500 mm 时缩小或放大参照模型的尺寸, 喉口速度均保持在较高水平, 而且随着尺寸由大到小, 喉口风速也是呈现出正相关线性变化趋势, 但是当喉口直径低于 500 mm 时, 喉口风速会急剧下降, 喉口风速大小依然呈现与模型尺寸大小成正相关的变化趋势。分析原因: 空气具有一定的粘性, 根据粘性力方程  $\tau = \mu \cdot du/dz$ , 在模型尺寸较小时(即  $z$  值较小时), 模型内流场的速度梯度  $du/dz$  较大, 粘性应力以及摩擦损失较高, 进而阻止了风筒内气体流速的提高, 而当模型尺寸较大时, 这种阻碍作用相对减弱。而且模型较小时, 边界层厚度相对于模型尺寸来说就相对较大, 边界层效应带来的流动损失也会更大, 因而在模型喉口直径低于 500 mm 后, 喉口风速的下降速度也会加快。当模型尺寸放大到参照组模型的 2.4 倍(喉口直径 1200 mm)及以上时, 喉口的风速并不能带来较为明显的提升, 这也与边界层效应和空气粘性效应相对于模型整体尺寸来说达到饱和有关。

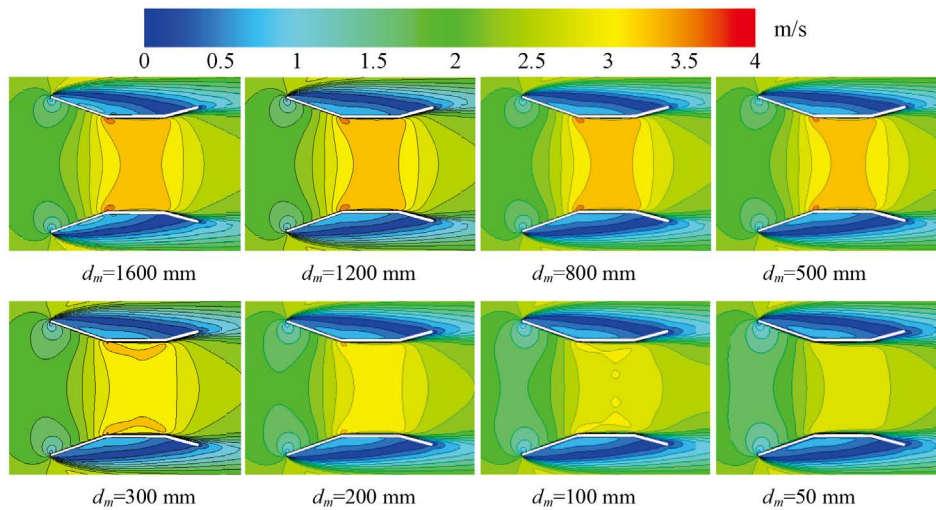


Figure 5. Velocity contours of air duct at different size  
图 5. 不同尺度下的风筒速度云图

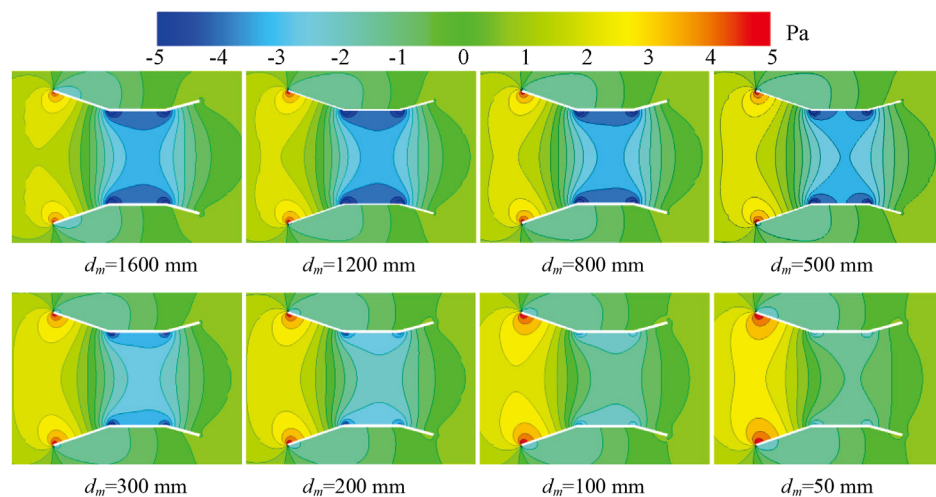
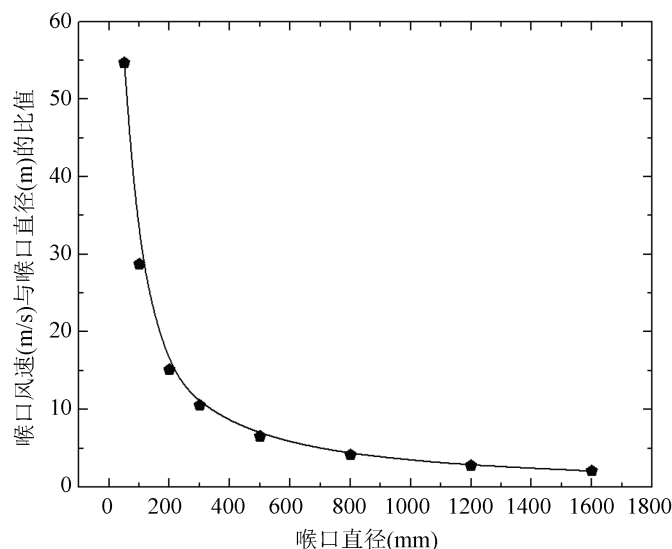


Figure 6. Pressure clouds of air duct at different size  
图 6. 不同尺度下的风筒压力云图

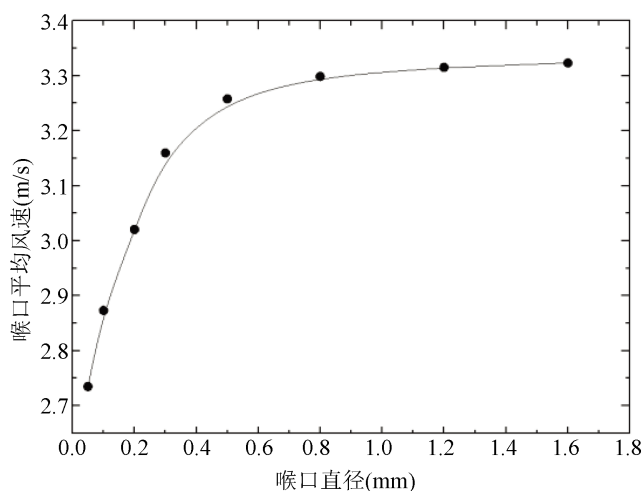




**Figure 7.** Relationship between the wind speed ratios and air duct size  
**图 7.** 聚风筒喉口风速比随风筒尺寸的变化曲线

根据边界层理论可知, 流体贴近固体壁面的速度为零, 并沿着径向逐渐提升至和喉口最大风速值相接近, 由于不同尺寸的模型喉口风速值近似为 3 m/s, 变化幅度小, 而模型的喉口直径却有较大变化, 根据粘性应力理论, 流体在模型喉口处速度沿着径向变化将有很大差距, 粘性应力的大小也相差甚远。本文为表征粘性力针对不同规格聚风筒的尺寸效应, 将模型喉口平均风速与喉口直径的比值作为速度梯度  $du/dz$  的近似代替, 绘制成如下曲线, 考察该特征曲线同时对比图 7 可以看出, 随着模型尺寸的减小, 喉口风速急剧下降的同时, 喉口处的速度梯度也急剧上升, 由此侧面说明了上述尺寸效应分析的正确性。

针对不同尺寸的数值模型, 对其喉口截面风速值取加权平均, 绘制成如图 8 所示特征曲线, 当喉口直径低于 500 mm 时, 模型尺寸对模型气动特性的影响明显, 且尺寸越小, 喉口风速的下降趋势越大, 而高于此值时, 逐渐增大模型尺寸, 模型喉口风速的增加趋势将逐渐趋缓, 此结果与上述云图分析结果吻合。



**Figure 8.** Curve of average wind speeds at different sizes of the air duct  
**图 8.** 不同尺度下的喉口平均风速变化曲线

## 5. 结论

本文研究了聚风筒在低品位风能汇聚下的尺寸效应，考察了不同尺寸下聚风结构内外的流动分布和特征，同时也量化分析了尺寸效应对于汇聚特性的影响规律，得到结论如下：

1) 针对本文研究的聚风筒结构，喉口处的聚风能力与风筒尺寸成正相关关系，变化曲线符合指数型变化规律，当喉口直径低于 500 mm 时，风筒的聚风能力会随着尺寸的减小急剧下降，而风筒直径高于 500 mm 时，风筒聚风能力的上升幅度将减弱，并随尺寸的增大而逐渐趋于平稳。

2) 聚风筒的尺寸效应与聚风筒内粘性力摩擦损失的大小密切相关，风筒尺寸较小时，筒内流体速度梯度大，摩擦损失高，聚风效率低；风筒尺寸较大时，筒内流体速度梯度小，摩擦损失低，聚风效率高。

## 基金项目

湖北省技术创新专项重大项目(编号：2017AAA035)；低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室开放基金(No. LLEUTS-201905)。

## 参考文献

- [1] 王述洋, 张臣. 风力发电机风速放大器的研究与优化设计[J]. 可再生能源, 2016, 34(9): 1348-1355.
- [2] 田德, 姬忠涛, 韩巧丽. 浓缩风能装置内部流场模拟计算可靠性分析[J]. 太阳能学报, 2014(12): 2362-2367.
- [3] 林俊杰, 田德, 邓英. 浓缩风能装置流场仿真与优化设计[J]. 太阳能学报, 2016, 37(7): 1891-1899.
- [4] 姬忠涛, 田德. 有机玻璃材料的浓缩风能装置流固耦合分析[J]. 农业工程学报, 2016(11): 98-102.
- [5] 姬忠涛, 田德, 韩巧丽. 浓缩风能装置内部流场仿真计算分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2017, 39(2): 212-218.
- [6] 大屋裕二, 烏谷隆, 张兴. 紧凑式聚风型风机及其大型化研究[J]. 上海电力, 2009(3): 207-212.
- [7] 刘洁, 陈凯, 张兴. 聚风型风力机尾流的数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2013(11): 2140-2143.
- [8] 翟建华. 计算流体力学(CFD)的通用软件[J]. 河北科技大学学报, 2005, 26(2): 161-166.

### 知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2328-0557，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ijfd@hanspub.org](mailto:ijfd@hanspub.org)