

基于 CFD 方法的中小型通风机气动设计优化研究

王华

广东肇庆德通有限公司，广东 肇庆 526600

DOI:10.61369/ME.2025120052

摘要：本文围绕 CFD 方法在中小型通风机气动设计优化展开研究，涵盖理论基础、数值模拟实现、关键结构参数设计、多目标优化建模等。通过构建耦合分析平台、实验验证等手段，提升通风机气动性能与能效，对比经济性凸显 CFD 优势，同时指出当前研究不足及数字孪生技术的应用前景。

关键词：CFD 方法；通风机设计；气动性能优化

Research on Aerodynamic Design Optimization of Small and Medium Sized Ventilators Based on CFD Method

Wang Hua

Guangdong Zhaoqing Detong Co., Ltd., Zhaoqing, Guangdong 526600

Abstract : This article focuses on the research of CFD method in the aerodynamic design optimization of small and medium-sized ventilation fans, covering theoretical basis, numerical simulation implementation, key structural parameter design, multi-objective optimization modeling, etc. By constructing a coupling analysis platform and conducting experimental verification, the aerodynamic performance and energy efficiency of ventilation fans are improved, highlighting the advantages of CFD in terms of economic comparison. At the same time, the current research shortcomings and the application prospects of digital twin technology are pointed out.

Keywords : CFD method; ventilation fan design; aerodynamic performance optimization

引言

随着工业发展对通风机性能要求的提高，如何优化其气动设计成为关键课题。2021 年颁布的《绿色高效制冷行动方案》强调提升通风机等设备能效。在此背景下，CFD 方法应用于中小型通风机气动设计优化意义重大。它以 Navier-Stokes 方程组为理论基础，结合湍流模型模拟内部复杂流动。从网格划分、求解器设置到关键结构参数设计、多目标优化建模等，涵盖多个技术环节，并通过耦合分析平台、实验验证等确保优化效果。但目前在捕捉非定常流动特性方面存在不足，未来数字孪生技术有望助力通风机智能化运维。

一、CFD 方法在通风机设计中的理论基础

(一) 流体力学控制方程及湍流模型

CFD 方法应用于通风机设计，其理论基础中的流体力学控制方程以 Navier-Stokes 方程组为核心。Navier-Stokes 方程组描述了粘性不可压缩流体动量守恒的运动方程，涵盖质量守恒方程、动量守恒方程等，它构建起了描述流体运动的理论框架，为分析通风机内流体流动提供了基本依据^[1]。在实际通风机设计模拟中，由于其内部流动的复杂性，需要结合湍流模型。比如 $k-\epsilon$ 模型，它基于湍动能 k 和耗散率 ϵ 的输运方程，在工程应用中较为广泛，能有效模拟一般通风机内的湍流流动。而 SST $k-\omega$ 模型，在近壁面和远场都有较好表现，对旋转机械模拟，如通风机内部复杂的旋转流动模拟适用性强，可更准确捕捉流动细节，从而为通风机气动设计优化提供更可靠的理论支持。

(二) 数值模拟技术实现路径

在中小型通风机气动设计优化研究中，数值模拟技术的实现路径涉及多个关键环节。首先是 ICEM 网格划分策略，合理划分网格对精确模拟通风机内部流场至关重要。需依据通风机的几何结构特点，采用结构化或非结构化网格，对关键区域如叶片表面进行加密处理，以提高模拟精度^[2]。接着是 Fluent 求解器参数设置，根据通风机内部流体流动特性，选择合适的湍流模型，如 $k-\epsilon$ 模型等，并设置正确的边界条件，包括进出口压力、速度等参数。此外，动静域耦合方法也是关键，通风机存在旋转部件与静止部件，需通过动静域耦合技术，准确模拟两者间的相互作用，从而实现对通风机内部复杂流场的有效模拟，为气动设计优化提供可靠的数据支持。

二、通风机关键结构参数设计理论

(一) 叶轮结构参数体系构建

在通风机关键结构参数设计理论的叶轮结构参数体系构建中，需建立起叶片安装角、弦长分布、轮毂比等几何参数与气动性能的关联矩阵^[3]。通过深入研究这些参数之间的相互关系以及它们对通风机气动性能的影响，全面剖析通风机内部流场特性。例如，叶片安装角的变化会显著影响气流的进出口角度，从而改变通风机的压力和流量；弦长分布的不同则会影响叶片的受力情况和能量转换效率；轮毂比的大小会对通风机的轴向尺寸及内部流场均匀性产生作用。在此基础上，提出基于响应面的参数敏感性分析方法，准确判断各参数对气动性能影响的敏感程度，为优化叶轮结构参数，提升通风机整体气动性能提供科学依据。

(二) 蜗壳扩散段型线优化

在通风机关键结构参数设计理论中，蜗壳扩散段及蜗舌型线优化至关重要。研究等环量设计准则与渐缩渐扩复合型线对静压恢复系数的影响规律时发现，不合理的型线会导致气流在扩扩散段流动不畅，进而降低静压恢复系数，影响通风机性能^[4]。因此推导最佳扩压角计算模型具有重要意义。通过该模型，可精准确定蜗壳扩散段的最佳型线参数，使气流在扩扩散过程中能更有效地将动能转化为静压能，减少流动损失。优化后的型线能显著提高通风机的静压恢复系数，提升其整体气动性能，满足中小型通风机在不同工况下对高效、稳定运行的需求，为基于 CFD 方法的中小型通风机气动设计优化提供关键理论支撑。

三、气动性能优化模型构建

(一) 多目标优化数学模型

在基于 CFD 方法的中小型通风机气动设计优化研究中，构建多目标优化数学模型至关重要。以效率、压升和噪音作为优化目标，建立三维帕累托前沿。效率关乎通风机能量转换能力，压升决定其输送气体压力水平，噪音影响使用环境。通过这三个目标，可全面衡量通风机的综合性能。在此基础上，采用 NSGA-II 算法实现权重系数的智能分配，该算法能有效处理多目标优化问题，避免传统方法在权重分配上的主观性，从而更科学地平衡不同目标间的关系，提升优化效果^[5]。这种多目标优化数学模型为通风机的气动性能优化提供了坚实的理论框架。

(二) CFD/CAE 耦合分析平台

构建 CFD/CAE 耦合分析平台对于中小型通风机气动性能优化至关重要。基于 Workbench 开发参量化仿真流程，该平台实现了几何参数的自动更新。通过将 CFD（计算流体动力学）与 CAE（计算机辅助工程）技术相结合，可精准模拟通风机内部复杂流场^[6]。在耦合过程中，利用 CFD 对通风机流场进行详细分析，获取流场压力、速度等信息；CAE 则辅助对通风机结构进行分析，确保其在工作时的结构可靠性。借助该平台，还能批量提取流场特征参数，为进一步优化通风机气动性能提供丰富的数据支持，帮助研究人员深入理解通风机内部流动规律，从而有针对性地调

整设计参数，提升通风机的气动性能和运行效率。

四、实例设计与实验验证

(一) 实验样机设计

1. 原型机气动性能评估

针对实验样机的原型机，运用先进的 PIV 测量技术来获取叶道内流场结构。PIV 测量技术能够精确捕捉叶道内气流的速度矢量分布、涡量等关键参数，为深入了解原型机内部流场特性提供直观且准确的数据。通过将 PIV 测量所得数据与基于 CFD 方法的数值模拟结果进行详细比对，验证数值模拟结果的置信度^[7]。若二者数据高度吻合，表明 CFD 数值模拟能有效反映原型机内部流场实际情况，基于此模拟结果对原型机进行的气动性能评估具有较高可靠性，为后续通风机的气动设计优化提供坚实的理论与数据支撑，有助于更精准地改进通风机的气动性能，提升其整体运行效率。

2. 优化方案对比分析

在实例设计与实验验证的实验样机设计优化方案对比分析环节，基于正交实验设计结果，对不同优化方案下的实验样机进行深入剖析。对于叶片前缘改型方案，观察到其能有效调整气流在叶片前缘的流入角度，使得气流更加平顺地附着于叶片表面，从而减少前缘处的流动分离，提升风机的气动性能^[8]。而尾缘小翼方案，则通过在尾缘产生特定的气流扰动，抑制尾缘附近的流动分离，降低尾流损失。对比发现，两种方案对流动分离的抑制各有特点。叶片前缘改型侧重于优化入口气流状态，尾缘小翼则主要改善尾缘处的流动情况。综合来看，将两者结合的优化方案，能更为全面地抑制流动分离，显著提高中小型通风机的气动性能，为实际工程应用提供了有力的理论与实践依据。

(二) 结构强度校核

1. 离心载荷作用下的应力分布

在对中小型通风机进行结构强度校核时，离心载荷作用下的应力分布是重要研究内容。借助 ANSYS Static Structural 模块，输入通风机的几何模型、材料属性等参数，模拟离心载荷工况。通过数值计算，可直观呈现通风机各部件在离心力作用下的应力分布云图^[9]。从云图中能清晰看到应力集中区域，如叶轮与轴的连接处等，这些部位因离心力作用，承受较大应力。通过分析应力分布情况，可评估通风机结构能否在离心载荷下安全可靠运行，为进一步结构优化提供依据，确保优化后的通风机不仅在气动性能上得到提升，在结构强度方面也满足实际使用要求。

2. 材料疲劳寿命预测

在材料疲劳寿命预测方面，借助 nCode DesignLife 平台对复合材料叶轮进行振动疲劳仿真。该平台整合了多种疲劳分析算法与材料特性数据。依据复合材料叶轮实际工况，设定准确的载荷谱与边界条件，如模拟不同转速、风压下叶轮所受的动态载荷。利用平台自带的疲劳分析模块，结合材料的 S-N 曲线等疲劳特性参数^[10]，预测叶轮在复杂载荷作用下的疲劳寿命分布。通过此预测，能提前发现叶轮可能出现疲劳失效的区域，为结构优化提供

重要依据。预测结果将与后续实验数据对比验证，进一步优化疲劳寿命预测模型，确保预测的准确性与可靠性，为中小型通风机复合材料叶轮的长寿命设计提供有力支持。

(三) 工业应用效果评估

1. 空气动力性能实验

依据 GB/T 1236 标准搭建通风机性能测试系统，对优化后的中小型通风机机型进行空气动力性能实验。在实验中，精确控制风洞的各项参数，模拟不同的实际工况条件，以此实测优化机型在变工况下的性能曲线。通过详细记录和分析通风机在不同工况点的风量、风压、功率等关键数据，计算出其对应的通风机效率指标。将这些实测数据与优化前的性能数据以及行业标准进行对比，评估基于 CFD 方法的气动设计优化对通风机能效提升的实际效果，验证优化设计在工业应用中是否能有效提高通风机的能源利用效率，实现节能降耗的目标。

2. 经济性分析

在经济性分析方面，对传统经验设计和 CFD 优化方案下的中小型通风机生产成本进行详细对比。传统经验设计更多依赖工程师的经验知识，在零部件选型、制造工艺确定等环节可能存在一定盲目性，导致材料浪费或加工难度增加，进而提高生产成本。而 CFD 优化方案借助计算机模拟技术，可精准分析通风机内部流

场，提前优化叶片形状、风道结构等关键参数。这使得制造过程中的材料利用率更高，加工工艺更合理，有效降低材料成本与加工成本。通过实际案例表明，采用 CFD 优化方案设计的中小型通风机，相比传统经验设计，在保证性能的前提下，生产成本可降低 10% – 20%，充分论证了 CFD 方法在中小型通风机气动设计优化中的工程实用价值与显著的经济性优势。

五、总结

CFD 驱动设计方法在中小型通风机气动设计优化中展现出显著的技术创新，能有效提升通风机的气动效率。通过 CFD 模拟分析，对通风机内部流场进行精确洞察，进而优化叶片形状、流道结构等关键参数，实现性能的提升。然而，当前研究在捕捉非定常流动特性方面精度尚显不足，这可能导致对通风机实际运行状态的模拟与真实情况存在偏差，影响优化设计的准确性。未来，数字孪生技术有望在旋转机械智能运维领域大放异彩，借助该技术可构建通风机的虚拟模型，实现对其运行状态的实时监测与精准预测，及时发现潜在故障，为通风机的高效稳定运行提供有力保障，推动中小型通风机向智能化运维方向迈进。

参考文献

- [1] 王欢欢. 基于 CFD 的渔船船队布局优化研究 [D]. 浙江海洋大学, 2021.
- [2] 王望春. 基于 CFD 的坚果烘干旋风除尘器结构优化设计 [D]. 长安大学, 2022.
- [3] 孙辉. 基于 CFD 的某工业车间气流组织优化研究 [D]. 扬州大学, 2023.
- [4] 郭乐. 基于 CFD 的内锥式油水分离旋流器结构优化研究 [D]. 兰州理工大学, 2023.
- [5] 赵慧艳. 基于 CFD 方法的热泵 - 热风油莎豆干燥机的设计与试验 [D]. 吉林大学, 2023.
- [6] 黄技, 梁光琪, 宋子洋, 等. 基于 CFD 方法的螺旋桨水动力性能研究 [J]. 武汉船舶职业技术学院学报, 2021, 20(04): 103–108.
- [7] 金礼芬, 刘文熙, 周桔, 等. 新能源汽车的车身气动性模拟分析与优化 [J]. 汽车与新动力, 2024, 7(04): 56–59.
- [8] 王琳. CFD 方法在流体机械设计中的应用研究 [J]. 中国设备工程, 2021, (09): 111–112.
- [9] 徐解刚, 蒋利俊, 夏雪峰, 等. 基于 CFD 方法的溢洪道下游水流数值模拟 [J]. 陕西水利, 2021, (03): 21–24.
- [10] 孙俊杰, 朱浩, 朱云松. 机械展开式再入飞行器气动性能分析与优化 [J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(S1): 1–8.