

飞机尾气扩散特性数值分析

罗定发¹, 李立坤², 王博¹, 杨军利², 肖毅^{2*}

(1.新疆机场(集团)有限责任公司, 乌鲁木齐 830016; 2.中国民用航空飞行学院
飞行技术学院, 四川 广汉 618307)

摘要: **目的** 基于计算流体动力学方法, 对飞机发动机排放的尾气扩散特性进行深入分析。**方法** 利用 Navier-Stokes 方程等流体力学控制方程, 设置适当边界条件和初始条件, 建立发动机尾气扩散的几何模型。分别分析不同风速和温度条件下飞机尾气的扩散行为, 并对尾气中 2 种主要有害气体组分的扩散行为进行分析。**结果** 数值模拟结果显示了扩散行为的基本特征, 尾气在发展的初始阶段主要贴近地面, 而在后续阶段由于温度效应逐渐抬升并与空气混合。同时, 展示了风速以及温度对尾气抬升行为的影响。**结论** 发动机尾气扩散的行为综合受到壁面效应与温度效应的影响, 且环境风速会影响气流的抬升高度。在实验条件下, 风速从 2 m/s 增长至 5 m/s, 抬升高度减少了约 3 m。环境温度对尾气扩散的影响较小。

关键词: 计算流体力学; 发动机排放; 浮力效应; 科恩达效应; 大气污染; 扩散

中图分类号: V235.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)04-0051-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.04.007

Numerical Analysis of Exhaust Diffusion Characteristics for Civil Aircraft

LUO Dingfa¹, LI Likun², WANG Bo¹, YANG Junli², XIAO Yi^{2*}

(1. Xinjiang Airport (Group) Co., Urumqi 830016, China; 2. School of Flight Technology, Civil Aviation
Flight University of China, Sichuan Guanghan 618307, China)

ABSTRACT: The work aims to have an in-depth analysis on characteristics of the exhaust diffusion from an aircraft engine by means of Computational Fluid Dynamics (CFD) methods. Fluid dynamics control equations such as Navier-Stokes equations were utilized, and appropriate boundary conditions and initial conditions were set to establish the geometric model of the engine exhaust diffusion. The numerical simulation results of the exhaust under different wind speed conditions were analyzed, and the diffusion behaviors of the two main harmful gas components in the exhaust were also analyzed. The numerical simulation results showed the basic mechanism of diffusion behavior, where the exhaust was mainly close to the ground in the initial stage of development, and gradually lifted up and mixed with the air in the subsequent stages due to the temperature effect, and the effect of wind speed on the lifting behavior of the exhaust was demonstrated. The behavior of the engine exhaust diffusion is affected by a combination of wall and temperature effects, and the ambient wind speed affects the lift height of the jet. Under the exper-

收稿日期: 2024-12-25; 修订日期: 2025-02-17

Received: 2024-12-25; Revised: 2025-02-17

基金项目: 四川省自然科学基金(2024NSFSC0875); 中央高校基本科研业务费(J2023-008)

Fund: The Sichuan Science and Technology Program (2024NSFSC0875); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (J2023-008)

引文格式: 罗定发, 李立坤, 王博, 等. 飞机尾气扩散特性数值分析[J]. 装备环境工程, 2025, 22(4): 51-58.

LUO Dingfa, LI Likun, WANG Bo, et al. Numerical Analysis of Exhaust Diffusion Characteristics for Civil Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(4): 51-58.

*通信作者(Corresponding author)

imental conditions, the wind speed increased from 2 m/s to 5 m/s and the lift height decreased by about 3 m. Ambient temperature has less effect on tailpipe dispersion.

KEY WORDS: CFD; engine emissions; buoyancy effect; Coanda effect; air pollution; dispersion

在过去的几十年里,航空运输的蓬勃发展极大地促进了全球经济的融合与文化的交流,成为了现代社会不可或缺的一部分。尽管前几年航空运输业受到了全球新冠疫情的影响,但疫情后行业的恢复和增长速度仍十分迅猛。根据 2023 年民航行业发展统计公报^[1]的数据显示,中国全行业运输航空公司完成运输飞行小时 $1\,220.9 \times 10^4$ h,运输起飞架次 492.19 万架次,分别比上年增长了 94.5% 和 91.8%。

然而,这一繁荣的背后,航空运输对环境的影响,尤其是对空气质量的影响,已成为不容忽视的问题。飞机发动机排放的尾气中含有氮氧化物、颗粒物、挥发性有机化合物等污染物,这些污染物对大气环境造成了沉重负担^[2-4]。据统计,航空业在全球范围内的氮氧化物排放量约占人为排放总量的 9%,而在某些机场周边区域,飞机尾气排放甚至成为主要的大气污染源。颗粒物和挥发性有机化合物等污染物同样对空气质量产生显著影响,它们不仅影响人类健康,还对生态系统造成损害^[5-7]。因此,研究航空运输对空气质量的影响,对于制定有效的环境保护政策和推动航空业可持续发展具有重要意义。

在探讨航空运输对空气质量影响的研究中,一般会有概率模型和 CFD 计算 2 种方法^[8]。概率模型通过统计分析预测污染物排放的随机性和不确定性,为环境风险评估提供重要工具。这些模型考虑了气象条件等因素,能够预测污染物对空气质量的影响范围和概率分布。在概率模型方面,应用范围最为广泛的是 Gaussian 模型。Zimmermann 等开发的 HIWEY 模式和 Beaton 等开发的 CALINE 模式是高斯模型最初用于气体扩散计算的代^[9-10]。在此基础上,学者们不断地创新、改进模型,将高斯模型应用于更多种的场景。孟凡鹏等^[11]利用试验数据改进了高斯羽流模型,对 CO₂ 运输的泄漏安全风险进行了评估,提高了源强度逆向计算的准确性。张锦荣^[12]构建了道路运输危险气体泄漏模型,并做了应急管理研究。曹惠玲等^[13-14]基于对高斯扩散模型的改进,对飞机在 LTO 阶段 PM_{2.5} 的排放及扩散进行了分析,并研究了对机场周边环境的影响。唐豪^[15]基于高斯扩散模型,对在航船舶的尾气扩散情况进行了研究。杨军利等^[16]基于改进的高斯扩散模型计算了起降阶段飞机的排放及扩散情况,并利用 CFD 进行了验证。在利用 CFD 计算污染物扩散方面,学者们也做了相当多的研究。齐爽^[17]对特定条件下室内颗粒物的运动分布特性进行了数值模拟研究。王占宇^[18]等建立了城市交叉路口仿真模型,利用 CFD 软件对机动车排放的颗粒物的分布特

征进行了分析。Khou 等^[19]对商用飞机的近场尾迹的形成进行了 CFD 模拟,并着重分析了燃料中硫含量的影响。Zhang 等^[20]利用 CFD 对商用飞机发动机模型燃烧室的 NO_x 排放进行了分析研究,为燃烧室的研究与设计作出参考。Enrico 等^[21]对发动机处于怠速条件下污染物的扩散进行了 CFD 分析,并测评了不同状况下停机坪附近的污染物浓度,为作业人员的健康提供理论保障。

综合当前研究结果,应用高斯扩散模型计算气体扩散情况的准确度很大程度上依赖于初始扩散参数的选择^[22],而利用 CFD 计算气体扩散又因为受到计算资源与速度的限制,难以快速计算大范围内的气体扩散。因此,考虑将二者结合,利用 CFD 计算尾气扩散的初始参数,以便后续对高斯模型进一步改进。具体做法:对排放源最重要的特征——废气流进行分析^[23]。废气流含有显著的动量与热浮力,因此可以将污染物输送到较远距离,并使羽流中心线上升一定距离,这些均会影响到高斯模型初始参数的选择。本文针对民用飞机在地面附近尾气流的数值模拟结果进行分析,以期为进一步的扩散建模提供初步数据。

1 计算模型与方法

1.1 控制方程

数值计算基于连续性方程、动量方程和能量方程进行求解^[24]。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; $\vec{u}$ 为速度矢量; t 为时间。

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -p + \rho g + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (2)$$

式中: p 为压力; g 为重力加速度; μ 为动力黏度。

能量方程:

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} (\rho E + p)) = \rho \vec{u} g - \nabla \cdot (\vec{q} + \vec{u} p) + \phi \quad (3)$$

式中: E 为单位质量的内能; $\vec{q}$ 为热流矢量; ϕ 为黏性耗散项。

1.2 湍流模型

常用的湍流模型主要有 $k-\varepsilon$ 模型、 $k-\omega$ 模型和大涡模拟 (LES), 综合考虑发动机射流的计算条件,

本研究使用标准 $k-\varepsilon$ 模型来计算。

湍流动能方程 (k 方程):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

其中, G_k 是由于平均速度梯度产生的湍流动能生成项, 通常表示为:

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x_i} \quad (5)$$

μ_t 是湍流黏性系数, 通常表示为:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

式中: σ_k 是湍流动能对应的普朗特数, 其值通常取 1.0。

湍流耗散率方程 (ε 方程):

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

式中: $C_{\varepsilon 1}$ 和 $C_{\varepsilon 2}$ 是模型常数, 通常 $C_{\varepsilon 1}$ 取值为 1.44, $C_{\varepsilon 2}$ 取值为 1.92; σ_ε 是湍流耗散率对应的普朗特数, 其值通常取 1.3。

1.3 计算模型及边界条件

计算流体动力学模拟中边界条件的正确设置能确保计算域内流场和热场的准确模拟, 如图 1 所示。发动机喷气入口边界: 速度入口。发动机喷气进入计算域的入口被设定为速度入口边界条件。具体参数: 入口速度设定为 100 m/s, 以模拟高速喷气效应; 入口温度设定为 423 K, 以反映喷气的热状态。

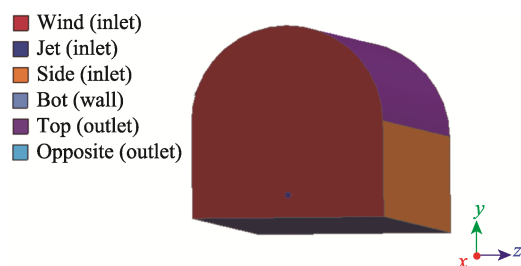


图 1 边界条件
Fig.1 Boundary condition

环境条件入口边界: 速度入口, 环境条件进入计算域的面同样设置为速度入口边界。该边界条件参数: 风速设定为 2 m/s, 风向与边界垂直; 入口温度设定为 300 K, 以匹配实际环境温度。同时, 计算域的两侧也设置为速度入口, 并采用速度规范法规定速度方向, x 向分量为 1。计算域上表面与速度入口相对面边界: 压力出口。计算域的上表面以及与速度入口相对的面被设置为压力出口边界条件。该设置允许

流体自由流出计算域, 同时保持出口处的压力稳定。地表边界: 固定壁面。计算域底部对应的地表被设定为固定壁面边界条件。该边界假设为无滑移条件, 即流体在壁面上无相对运动。

1.4 计算网格及敏感性分析

研究针对某型号飞机在地面的情况进行分析, 其排气喷管直径为 1 m, 发动机安装高度距离地面 3.5 m。在 Fluent 中建立三维模型, 并划分网格, 网格类型采用多面体网格, 网格质量均大于 0.5。另外, 在湍流模拟中, Y^+ 值的大小会影响边界层的求解精度。研究中通过估算第一层网格到壁面的距离, 再进行初始计算以确定 Y^+ 值在 30~100, 如图 2 所示。计算域的大小在水平方向为 220 m×30 m, 在垂直方向为 30 m。

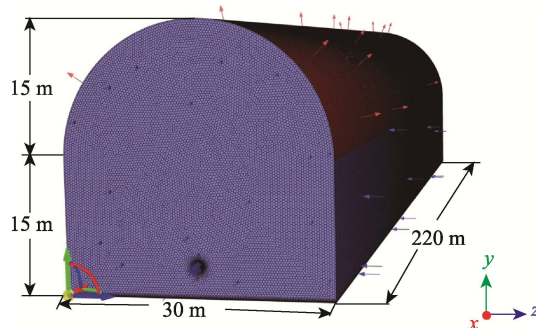


图 2 计算域及网格划分
Fig.2 Computational domain and meshing

为了确保数值模拟结果的准确性, 对网格进行无关性验证, 即验证网格密度对计算结果的影响。在本研究中, 分别使用网格数量为 200W、400W 和 700W 的模型进行了计算, 通过尾气速度分布结果对比分析网格密度的影响。3 种网格密度下射流的速度轮廓如图 3 所示。可以看出, 不同网格密度下, 射流的速度分布基本吻合, 射流的整体结构没有明显差异。

为了定量地分析网格密度的影响, 分别计算了 3 种网格密度下射流中轴线的速度分布曲线, 如图 4 所示。3 种网格密度下射流中轴线的速度分布曲线基本重合, 最大速度和速度衰减趋势均一致, 通过局部放大图可以看到差别仍然很小。进一步证实了网格密度对计算结果的影响较小。根据网格密度验证结果, 400W 网格计算结果与 700W 网格计算结果差异较小, 考虑计算资源的消耗, 本研究使用 400W 的网格进行计算分析。

2 数值方法验证

本文采用 SIMPLE 算法解决速度和压力之间的耦合关系。SIMPLE 算法是一种广泛应用的求解不可压缩流体流动问题的速度压力耦合方法。该方法通过迭代求解动量方程和压力修正方程, 实现速度和压力

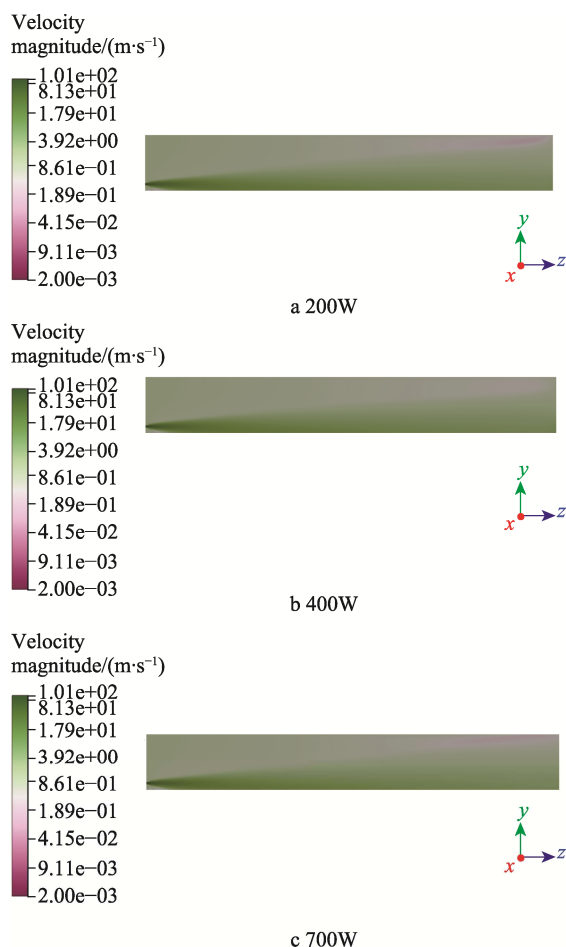


图3 不同网格数量下的速度轮廓
Fig.3 Velocity contours for different grids

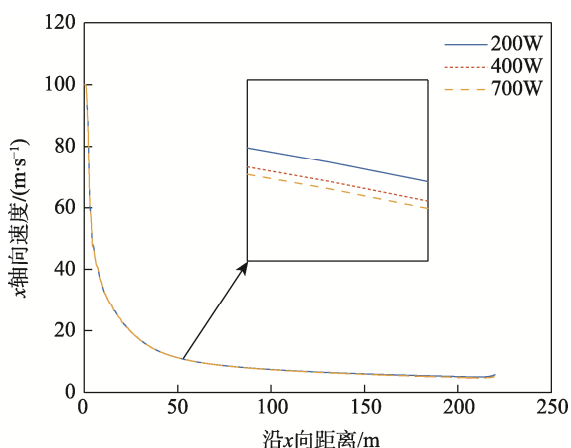


图4 射流中轴线速度变化曲线
Fig.4 Velocity variation curve of jet center axis

场的耦合。此外,采用有限体积法对控制方程进行离散化处理,扩散项和对流项采用二阶迎风差分方法,以保持较高的数值精度和稳定性。气体密度模型则使用理想气体模型,以更好地模拟尾气的垂直抬升行为。

为了验证计算方法的可靠性,将本研究的计算结果与文献[22]中的结果进行了对比。计算工况与文献一致,包括但不限于流体性质、入口流速、温度、压力等边界条件。气流中线速度随 x 轴向距离的变化对

比结果如图5所示。可以看出,本研究模拟的结果与文献结果比较相符。由于射流行为发生在近地面处,因此壁面效应占主导地位。废气流紧贴在地面,轴向速度分布则随着与飞机发动机距离的增加呈现出速度衰减的趋势。喷口附近二者的差异可能是由于文献中使用的离散格式差异。

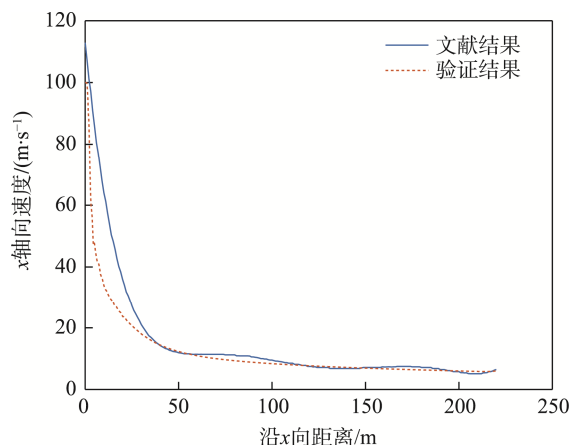


图5 流动方向的尾气速度对比
Fig.5 Comparison of exhaust velocity along flow direction

3 结果与分析

3.1 风速对射流的影响

计算域 xy 剖面上的速度云图如图6所示。可以看出,发动机尾气射流发展过程表现为从近场到远场的连续变化。在近场区域,尾气射流速度较高,形状较为狭窄,核心区域明显,混合作用初步开始。随着射流沿程发展,射流逐渐膨胀,湍流混合作用增强,速度分布趋于均匀,核心区域逐渐模糊。在远场区域,射流宽度增加速率减慢,速度分布进一步均匀化,混合程度达到最大。

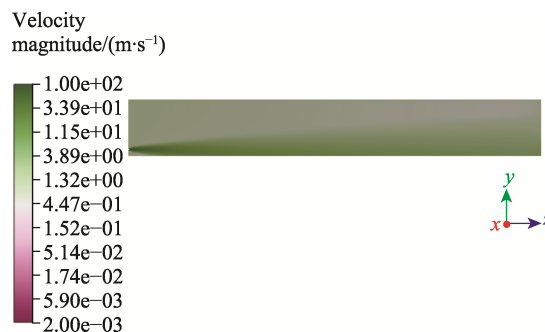


图6 速度轮廓
Fig.6 Velocity contour

飞机在运行过程中容易遭受到环境风,而环境风对发动机尾气扩散行为产生严重影响,进而导致发动机排放的污染物在环境中分布出现明显变化。为了探究风速对尾气扩散行为的具体影响,分别对风速为2、

3、5 m/s 时的工况进行数值模拟, 以得到不同风速条件下的速度轮廓, 进一步分析污染物的扩散特性。不同风速条件下的速度沿流动方向的变化曲线如图 7 所示。

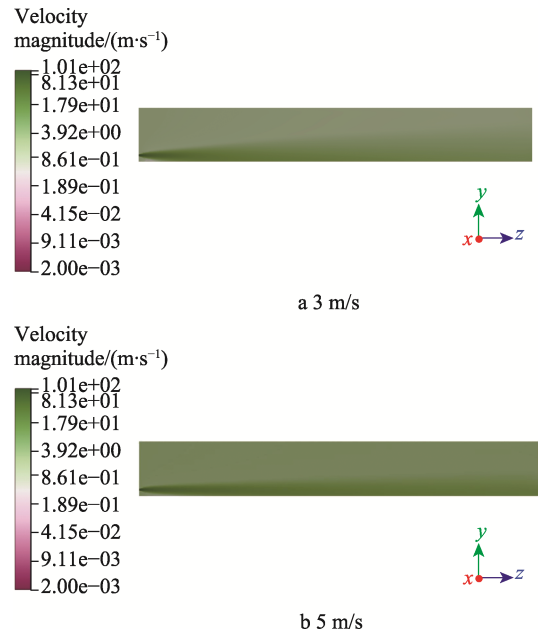


图 7 不同风速下的速度轮廓
Fig.7 Velocity contours at different wind speeds

结合图 5、图 7 对比 3 种风速下的计算结果, 可以观察到尾气的整体抬升幅度有所下降, 这表明气流抬升的高度会随着风速的增大而减小。对气流的抬升幅度进一步定量分析, 绘制出 3 种风速条件下尾气流的垂直高度随 x 轴向距离的变化曲线, 如图 8 所示, 尾流垂直高度定义为竖直剖面上尾流速度最大值所在的高度。其中, 风速从 2 m/s 增加到 3 m/s, 气流的抬升幅度减少了 1.9 m, 风速从 3 m/s 增加到 5 m/s, 气流的抬升幅度减少了 1.3 m。这意味着随着风速的增加, 气体在垂直方向的动量更容易被环境空气消耗, 从而导致气流的抬升高度降低。

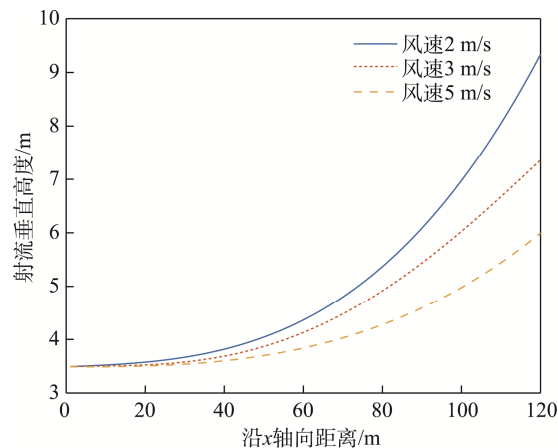


图 8 不同风速下尾气的垂直高度变化
Fig.8 Vertical height variation of exhaust at different wind speeds

更进一步地, 对不同风速下尾气中心线的速度变化情况绘制曲线, 如图 9 所示。由图 9 可知, 随着风速的增大, 气流在 x 方向的速度降低有所减缓。在沿 x 轴向 200 m 处的位置, 气流的速度分别为 4.87、5.98、10.40 m/s, 表明风速的增加会使尾气扩散区域更远。结合风速对气流的垂直高度的影响, 可以得出结论, 风速的增加将有助于尾气在水平方向的扩散, 而抑制尾气在垂直方向的扩散。定义尾气从喷气口的出口速度衰减到初始速度 10% 的距离为射流穿透长度, 在风速分别为 2、3、5 m/s 时, 射流穿透长度分别为 58.5、69.4、214.0 m。进一步表明风速对尾气在水平方向扩散的积极作用。

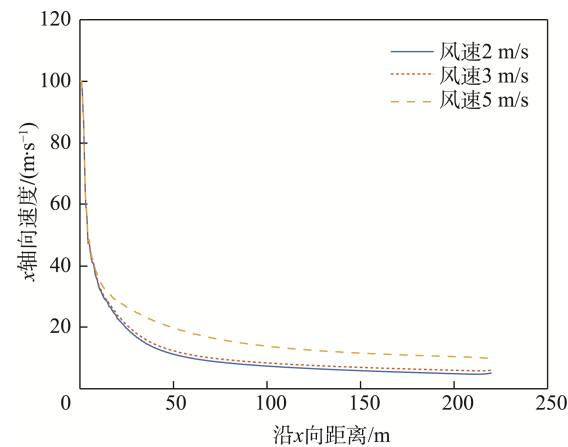


图 9 不同风速下尾气的速度曲线
Fig.9 Velocity profiles of exhaust at different wind speeds

3.2 不同组分的扩散行为

尾气射流在不同阶段的组成成分有所不同的^[25], 本文所考虑的情况是飞机处于怠速滑行阶段。根据 ICAO 的排放数据库^[26], 本文选取的发动机在怠速条件下 (推力设置为 7% 最大推力) 的排放参数见表 1。基于表 1 中数据及文献[21]所给数据, 则可以计算出尾气不同成分的质量分数。不考虑组分之间的化学反应, 利用 Fluent 中的组分输运模型对尾气射流中不同组分的扩散结果进行计算分析。CO 和 NO_x 这 2 种典型的有害气体扩散情况如图 10 所示。

计算结果显示, 虽然 2 种有害气体的质量分数占比区别较大, 但二者的扩散模式基本一致, 均受到尾

表 1 发动机怠速条件下部分排放参数
Tab.1 Some emission parameters under engine idling conditions

参数	值
涵道比	1.2
燃油流量	0.24 kg/s
HC 排放指数	103.8 g/kg _{fuel}
CO 排放指数	116 g/kg _{fuel}
NO _x 排放指数	2.7 g/kg _{fuel}

Mass fraction of CO



a CO

Mass fraction of NO

b NO_x

图 10 不同组分的质量分数分布图

Fig.10 Mass fraction distribution of different components

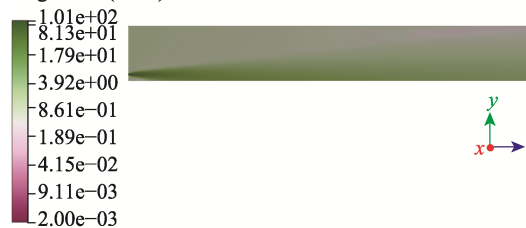
气射流整体动态的影响。由图 10 可以看出, NO_x 和 CO 的浓度分布显示出相似的扩散特征, 即在射流核心区域浓度较高, 随着距离的增加, 浓度逐渐降低并趋于均匀分布, 在经过射流与空气的充分混合后, 二者的质量分数相比于初始状态均降低了约 1 个数量级。对喷嘴所在高度的水平线上分别在不同距离取样本点, 获取 2 种气体的质量分数, 具体取样数据如表 2 所示。

表 2 NO_x、CO 的质量分数
Tab.2 Mass fraction of NO_x and CO

取样点/m	CO	NO _x
10	3.6×10^{-2}	7.1×10^{-4}
50	9.8×10^{-3}	1.9×10^{-4}
100	6.2×10^{-3}	1.24×10^{-4}
150	4.8×10^{-3}	9.70×10^{-5}
200	4.0×10^{-3}	8.09×10^{-5}

3.3 环境温度对扩散的影响

飞机所在运行环境中, 除了风速变化比较频繁以外, 温度差异同样较大。因此, 本文初步分析了温度对扩散特性的影响。为探究环境温度对尾气扩散的影响, 研究设置了环境温度分别为 290、310 K 的情况, 并与常温常压条件的 300 K 环境温度条件进行对比。290、310 K 环境温度条件下的速度轮廓如图 11 所示。可以发现, 环境温度的波动对于尾气扩散的影响并不明显。可能的原因是, 尾气与环境的温差虽然较大, 但是压力变化较小, 气体物性参数变化不显著。尾气扩散的湍流特性未受到环境温度小幅波动的显著影响。基于前文研究结果, 扩散特性行为主要受动量变化导致, 在压力变化较小情况下, 一定的温差引起的能量转化不明显。

Velocity magnitude/(m·s⁻¹)

a 290 K

Velocity magnitude/(m·s⁻¹)

b 310 K

图 11 不同环境温度下的速度轮廓

Fig.11 Velocity contours at different ambient temperature

4 结论

本研究利用数值模拟方法分析了飞机发动机尾气扩散的特性, 通过对比模拟结果与文献结果验证了模拟方法的可靠性, 并进一步对影响尾气扩散的因素进行了分析, 结论如下:

1) 环境风速的增加对气体在垂直方向的抬升有抑制作用, 实验条件下 (发动机推力设置为 7%, 排气速度为 100 m/s, 环境温度为 290 K, 标准大气压) 风速从 2 m/s 增加到 5 m/s, 射流的抬升高度减少了约 3.2 m。

2) 环境温度对于尾气的扩散特性影响不明显, 环境温度从 290 K 上升到 310 K, 尾气扩散的特性并没有明显变化。

出于对问题的简化假设, 本研究对尾气射流中可能存在的成分之间的化学反应并未考虑, 且结论主要基于数值模拟结果。未来可以结合实验数据, 对射流行为进行更深入的分析, 进一步探讨环境因素和成分之间的化学反应对尾气扩散特性的具体影响。

参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 2023 年民航行业发展统计公报 [EB/OL]. (2024-05-01)[2024-12-01]. <https://www.mot.gov.cn/tongjishuju/minhang/202406/P020240621367394142022.pdf>. Civil Aviation Administration of China. Statistical Bulletin on Civil Aviation Industry Development 2023[EB/OL]. (2024-05-01)[2024-12-01]. <https://www.mot.gov.cn/>

- tongjishuju/minhang/202406/P020240621367394142022.pdf.
- [2] LEE D S, FAHEY D W, FORSTER P M, et al. Aviation and Global Climate Change in the 21st Century[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(22/23): 3520-3537.
- [3] EMISSIONS F A A A. Impacts & Mitigation: A Primer[R]. Washington D C: FAA Office of Environment and Energy, 2015.
- [4] SUTKUS D J, BAUGHCU, S L DUBOIS D P. Scheduled Civil Aircraft Emission Inventories for 1999: Database Development and Analysis[R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, 2001.
- [5] STETTLER M E J, EASTHAM S, BARRETT S R H. Air Quality and Public Health Impacts of UK Airports. Part I: Emissions[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(31): 5415-5424.
- [6] OWEN B, ANET J G, BERTIER N, et al. Review: Particulate Matter Emissions from Aircraft[J]. Atmosphere, 2022, 13(8): 1230.
- [7] MASIOL M, HARRISON R M. Aircraft Engine Exhaust Emissions and Other Airport-Related Contributions to Ambient Air Pollution: A Review[J]. Atmospheric Environment, 2014, 95: 409-455.
- [8] SYNYLO K, ZAPOROZHETS O, STILLER J, et al. Improvement of Airport Local Air Quality Modeling[J]. Journal of Aircraft, 2017, 54(5): 1750-1759.
- [9] 赵佳, 闫学东, 王江锋. 机动车尾气排放和扩散研究综述[J]. 公路交通科技, 2011, 28(S1): 147-153.
- ZHAO J, YAN X D, WANG J F. Review of Studies on Vehicle Emission and Diffusion[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(S1): 147-153.
- [10] 刘坡, 王莹. 基于 3D GIS 的机动车尾气扩散模拟和可视化研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(6): 933-940.
- LIU P, WANG Y. Diffusion Simulation and Volume Visualization of Vehicle Exhaust Based on 3D GIS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(6): 933-940.
- [11] 孟凡鹏, 远双杰, 安永胜, 等. 改进的高斯扩散模型在 CO₂ 泄漏安全风险评估中的应用[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(12): 4820-4825.
- MENG F P, YUAN S J, AN Y S, et al. Application of an Enhanced Gaussian Diffusion Model in the Safety Risk Assessment of CO₂ leakage[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(12): 4820-4825.
- [12] 张锦荣. 道路运输危险气体泄漏扩散模型构建与应急管理研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- ZHANG J R. Study on the Model Construction and Emergency Management of Dangerous Gas Leakage and Diffusion in Road Transportation[D]. Xi'an: Changan University, 2016.
- [13] 曹惠玲, 李玉铭, 晏嘉伟, 等. 基于修正 Gaussian Puff 模型的飞机 LTO 循环 PM_{2.5} 排放及扩散特性研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(3): 352-361.
- CAO H L, LI Y M, YAN J W, et al. Research on PM_{2.5} Emission and Diffusion Characteristics of Aircraft LTO Cycle Based on Modified Gaussian Puff Model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(3): 352-361.
- [14] 曹惠玲, 晏嘉伟, 匡家骏, 等. 飞机排放对机场周边环境的影响研究[J]. 航空动力学报, 2023, 38(10): 2501-2515.
- CAO H L, YAN J W, KUANG J J, et al. Research on Impact of Aircraft Emissions on Surrounding Environment of Airports[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(10): 2501-2515.
- [15] 唐豪. 基于高斯模型的在航船舶尾气扩散研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- TANG H. Study on Tail Gas Diffusion of Sailing Ships Based on Gaussian Model[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [16] YANG J L, LI L K, ZHENG X Y, et al. Pollutant Dispersion of Aircraft Exhaust Gas during the Landing and Takeoff Cycle with Improved Gaussian Diffusion Model[J]. Atmosphere, 2024, 15(10): 1256.
- [17] 齐爽. 通风模式及人员活动影响下室内空气及颗粒物运动分布特性的数值模拟研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2023.
- QI S. Numerical Simulation Study on Indoor Air and Particle Movement Distribution Characteristics under the Influence of Ventilation Mode and Personnel Activities[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2023.
- [18] 王占宇, 刘林涛, 周士兵, 等. 城市街道交叉口机动车排放颗粒物扩散分析[J]. 公路交通科技, 2024, 41(5): 178-185.
- WANG Z Y, LIU L T, ZHOU S B, et al. An Analysis on Diffusion of Vehicle Emission Particulate Matter at Urban Street Intersection[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(5): 178-185.
- [19] KHOU J C, GHEDHAÏFI W, VANCASSEL X, et al. CFD Simulation of Contrail Formation in the near Field of a Commercial Aircraft: Effect of Fuel Sulfur Content[J]. Meteorologische Zeitschrift, 2017, 26(6): 585-596.
- [20] ZHANG M, FU Z B, LIN Y Z, et al. CFD Study of NO_x Emissions in a Model Commercial Aircraft Engine Combustor[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(6): 854-863.
- [21] TESTA E, GIAMMUSO C, BRUNO M, et al. Fluid Dynamic Analysis of Pollutants' Dispersion Behind an Aircraft Engine during Idling[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2013, 6(2): 367-383.
- [22] SYNYLO K, KRUPKO A, ZAPOROZHETS O, et al. CFD Simulation of Exhaust Gases Jet from Aircraft Engine[J]. Energy, 2020, 213: 118610.
- [23] 王璐江. 基于 CFD 的欠膨胀气体射流与燃烧仿真分

- 析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- WANG L J. Simulation Analysis of Underexpanded Gas Jet and Combustion Based on CFD[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [24] JOHN D A. 计算流体力学基础及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- JOHN D A. Computational Fluid Dynamics[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [25] 郭文博. 燃料燃烧过程 CO、NO_x 排放机制[D]. 唐山: 华北理工大学, 2023.
- GUO W B. Emission Mechanism of CO and NO_x during Fuel Combustion[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2023.
- [26] ICAO. Aircraft Engine Emissions Data Bank[EB/OL]. 2018. [2023-12-22] <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>.