

# 不同旋翼间距下四旋翼悬停气动特性分析

孙 武<sup>1</sup>, 刘凤丽<sup>1\*</sup>, 郝永平<sup>2</sup>

<sup>1</sup>沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

<sup>2</sup>辽宁省先进制造技术与装备重点实验室, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月26日

## 摘 要

为研究不同旋翼间距对小型四旋翼无人机悬停气动特性的影响, 以采用旋翼直径10英寸螺距4.5英寸两叶桨的X型四旋翼为对象, 基于Simcenter STAR-CCM+建立三维数值模型, 采用多重参考系法(MRF)和SST k- $\omega$ 湍流模型, 对不同间距比工况下的平均推力、平均扭矩及流场分布进行仿真分析。结果表明: 四旋翼悬停状态下存在明显的旋翼间气动干扰, 小间距条件下平均推力和平均扭矩均低于孤立单旋翼基准值; 随着旋翼间距增大, 四旋翼平均推力和平均扭矩逐渐增大, 并在较大间距下趋于稳定。速度云图和桨盘下方5 mm处压强云图表明, 增大旋翼间距能够减弱相邻旋翼尾流交叠和局部压力场耦合作用, 使流场分布更加规整。但当间距增大到一定程度后, 其改善作用趋于有限。研究结果可为小型四旋翼旋翼布局优化提供参考。

## 关键词

四旋翼无人机, 悬停, 旋翼间距

# Analysis of Aerodynamic Characteristics of Quadrotor Hovering at Different Spacings

Wu Sun<sup>1</sup>, Fengli Liu<sup>1\*</sup>, Yongping Hao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

<sup>2</sup>Liaoning Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology and Equipment, Shenyang Liaoning

Received: April 25, 2026; accepted: May 18, 2026; published: May 26, 2026

## Abstract

To investigate the influence of different rotor spacings on the hover aerodynamic characteristics of small quadrotor UAVs, this study focuses on an X-configuration quadrotor equipped with 10 × 4.5 two-blade propellers. A three-dimensional numerical model was established using Simcenter STAR-CCM+, employing the Multiple Reference Frame (MRF) method and the SST k- $\omega$  turbulence

\*通讯作者。

model. Simulations were conducted to analyze the average thrust, average torque, and flow field distribution under various spacing ratios. The results indicate that significant aerodynamic interference exists between rotors during quadrotor hover. At smaller spacings, both average thrust and torque are lower than the baseline values of an isolated single rotor. As rotor spacing increases, the quadrotor's average thrust and torque gradually rise and stabilize at larger spacings. Velocity contours and pressure contours 5 mm below the rotor disk demonstrate that increasing rotor spacing reduces wake overlap and local pressure field coupling between adjacent rotors, leading to more organized flow field distribution. However, the improvement effect becomes limited when spacing exceeds a certain threshold. These findings provide valuable insights for optimizing rotor layout in small quadrotor designs.

## Keywords

### Quadcopter, Hover, Rotor Spacing

Copyright © 2026 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

近年来,四旋翼无人机因具有垂直起降、悬停灵活、结构紧凑和操控性好等优点,已广泛应用于巡检监测、应急救援、农业植保和低空物流等领域。随着小型化和高效化需求的不断提升,旋翼气动性能及旋翼间气动干扰问题逐渐成为影响四旋翼飞行效率与稳定性的关键因素[1]。已有研究表明,计算流体力学方法能够较好地描述旋翼流场细节,揭示桨盘诱导速度、尾流演化及压力分布等特征[2];同时,多旋翼系统中相邻旋翼之间普遍存在气动干扰,旋翼间距的变化会显著影响四旋翼的升力、扭矩及整体气动性能[3]。类似研究也指出,在悬停状态下,随着旋翼间距变化,旋翼间干扰强度及流场结构会发生明显改变,合理的间距布置有助于减弱尾流耦合并改善整体气动性能[4]。因此,针对四旋翼悬停工况开展不同旋翼间距下的气动特性数值研究,对优化旋翼布局、提高悬停效率以及为小型四旋翼总体设计提供参考具有实际意义。

另有研究表明,流体力学数值模拟方法能够较好表征旋翼附近速度场、尾流演化及压力分布等流动细节,在多旋翼气动分析中具有较高的适用性[5]。相关研究围绕悬停状态下旋翼间干扰、不同构型无人机气动特性以及低雷诺数微型四旋翼流场分布等问题开展了分析,指出四旋翼工作过程中相邻旋翼之间普遍存在气动干扰,且旋翼间距变化会显著影响升力、扭矩及整体流场结构[6]。已有类似工作还发现,在悬停工况下,旋翼间干扰强度并非随间距单调变化,而是会随着间距改变表现出先增强后减弱的规律,说明合理的旋翼布局参数对提升四旋翼整体气动性能具有重要作用[7]。

基于上述研究基础,本文以小型四旋翼无人机为研究对象,针对悬停工况下不同旋翼间距的气动特性开展数值模拟分析。建立包含旋转区域与静止区域的三维计算模型,采用CFD方法对不同间距条件下四旋翼的推力变化及典型流场分布进行对比研究,重点分析旋翼间距对旋翼间气动干扰、下洗流结构及整体悬停性能的影响规律。通过定量结果与流场云图相结合,揭示不同间距条件下尾流交叠和干扰强弱的变化特征,为四旋翼布局优化和悬停性能提升提供参考。

## 2. 数值模型与求解方法

### 2.1. 四旋翼计算模型与工况设置

四旋翼无人机常用旋翼布局形式主要有“X”型布局和“十”型布局两种[8]。考虑到“X”型布局在

飞行稳定性方面具有一定优势,本文研究对象采用“X”型四旋翼布局[9]。旋翼选用直径 10 英寸螺距 4.5 英寸的两叶桨,桨叶直径为 254 mm。为平衡旋翼反扭矩,四个旋翼采用相邻反向旋转、对角同向旋转的布置方式。小型四旋翼三维模型如图 1 所示,其中  $L$  表示的是旋翼间距。

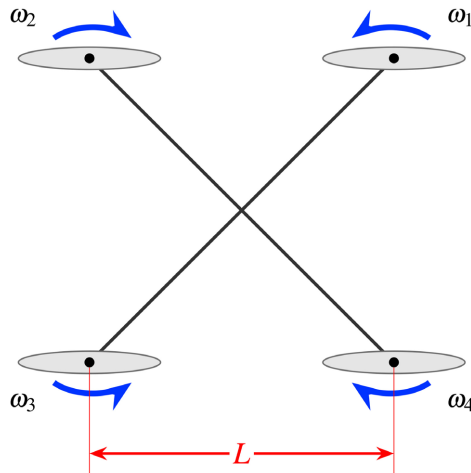


Figure 1. Small quadrotor 3D model  
图 1. 小型四旋翼三维模型

基于 STAR-CCM+软件建立小型四旋翼三维几何模型,各旋翼转速方向按上述旋向关系设置。本文以悬停状态下的小型四旋翼为研究对象,重点分析不同旋翼间距对其气动特性的影响[10]。计算中四个旋翼保持相同工作转速,转速设为 8500 r/min。为便于研究不同间距条件下旋翼间气动干扰及流场变化规律,设置五组不同间距比( $L/R$ )工况,其取值分别为 2.2、2.4、2.6、2.8 和 3.0。在不同间距条件下,对平均推力、平均扭矩和典型流场进行对比分析,以揭示旋翼间干扰对四旋翼悬停气动性能的影响规律[11]。四旋翼几何模型如图 2 所示。

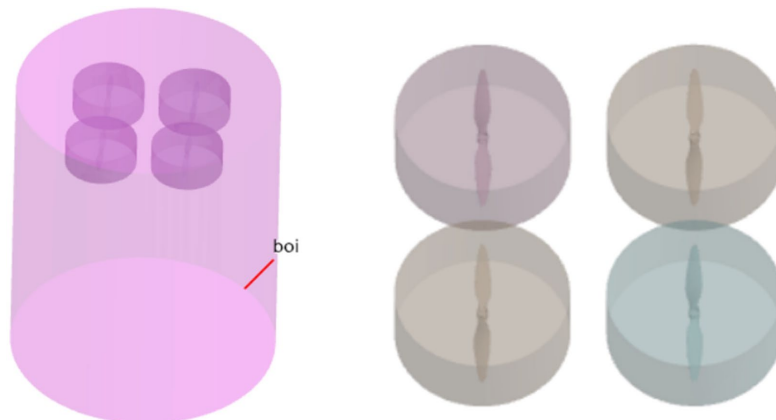


Figure 2. Quadrotor geometric model  
图 2. 四旋翼几何模型

## 2.2. 网格划分与边界条件

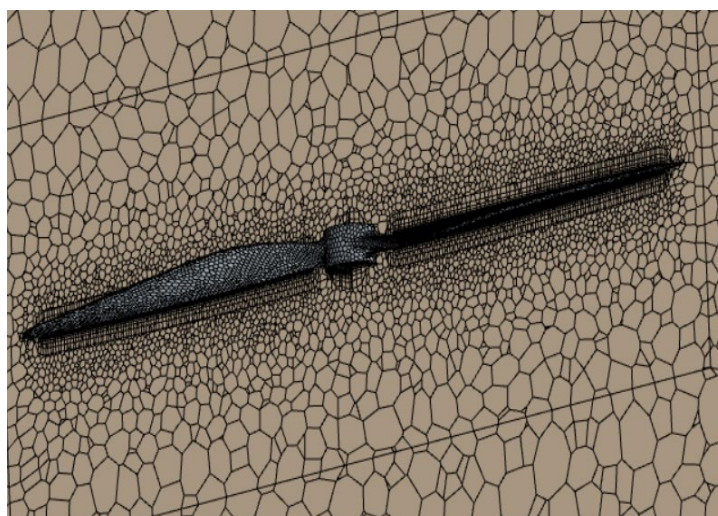
本文基于 Simcenter STAR-CCM+平台,采用 Automated Mesh 自动网格划分方法建立四旋翼流场网格。计算域采用外部静止球形域与局部加密区域相结合的建模方式。外部静止域设置为足够大的球形流

体域，局部网格加密区域为圆柱体。旋转域与静止域之间通过接口实现流场耦合，并采用多重参考系法(MRF)模拟旋翼转动效应。网格划分时，对旋翼表面、旋转域和静止域分别设置不同的网格尺寸，以兼顾计算精度与计算成本。最终生成总网格数量约为 154 万，网格质量较好，能够满足四旋翼悬停工况下的数值分析要求。主要网格参数及计算设置见表 1。局部网格划分结果如图 3 所示。

**Table 1.** Specific mesh division size

**表 1.** 网格具体尺寸

参数	数值
旋翼表面网格尺寸	2 mm
旋转域表面尺寸	最小 5 mm，目标 10 mm
静止域网格尺寸	10 mm
总网格数量	约 154 万



**Figure 3.** Local mesh generation results

**图 3.** 局部网格划分结果

为模拟四旋翼悬停状态下的开放空气环境，外部静止域用于表征旋翼周围自由空气区域，其球面外边界统一设置为压力出口边界，表压取 0 Pa。考虑到外边界位置对旋翼尾流发展的影响，为减弱边界作用，外部球形计算域半径取旋翼直径的 10 倍。本文所用旋翼直径为 254 mm，因此外部球形计算域半径取 2.54 m。四个转子域分别包络各旋翼，转子域与外部静止域之间通过交界面进行耦合，以实现旋转区域与静止区域之间的流场连续传递。桨叶及桨毂表面均设置为无滑移壁面。由于本文研究对象为悬停工况，计算中不施加来流速度，外边界主要作为开放环境边界处理。在最大间距比工况下，球面边界距最外侧桨尖仍保持较大距离，因此外边界对四旋翼近场气动干扰特性的影响可认为较小。

为验证四旋翼耦合工况下网格划分对计算结果的影响，选取旋翼间干扰最强的最小间距工况  $L/R = 2.2$  开展网格无关性验证。通过对旋翼表面、旋转域以及旋翼间中部干扰区域进行分级加密，分别构建粗、中、细三组网格，其总网格数约为 117 万、154 万和 235 万。以四旋翼总推力和平均扭矩作为判据，在计算结果稳定后取平均值进行比较。结果表明，随着网格加密，总推力和平均扭矩逐步收敛；其中，由中等网格进一步加密至细网格后，总推力和平均扭矩的变化幅度均较小，说明计算结果已基本实现网格无关。综合计算精度与计算效率，本文后续计算采用中等网格。

### 2.3. 数值方法与评价指标

本文研究对象为四旋翼悬停工况下的低速流动，可按不可压缩流体处理。数值计算采用稳态求解方式，并利用多重参考系法(MRF)模拟旋翼转动效应[12]。湍流模型选用 SST k- $\omega$  模型，以较好地描述旋翼周围复杂流场特征及尾流发展过程[13]。计算过程中对残差变化和旋翼推力监视量进行实时监测，当残差变化趋于稳定且推力监视量基本收敛后，认为计算结果达到收敛要求。

为定量分析不同旋翼间距条件下四旋翼悬停气动性能的变化规律，本文选取平均推力、平均扭矩和典型流场作为主要评价指标。其中，四旋翼总推力用于表征整体悬停能力，平均推力用于反映不同工况下单个旋翼受力水平的变化。同时，结合典型工况下的速度云图，对不同间距条件下旋翼间气动干扰及尾流分布特征进行分析。四旋翼总推力和平均推力可分别表示为：

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$$

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4}$$

式中， $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$  分别表示四个旋翼的推力， $T$  为四旋翼总推力， $\bar{T}$  为平均推力。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 单旋翼与四旋翼推力对比分析

为分析不同旋翼间距条件下四旋翼悬停气动性能的变化规律，将孤立单旋翼工况作为基准，对比相同转速条件下孤立单旋翼推力与四旋翼平均推力的变化情况，结果如图 4 所示。

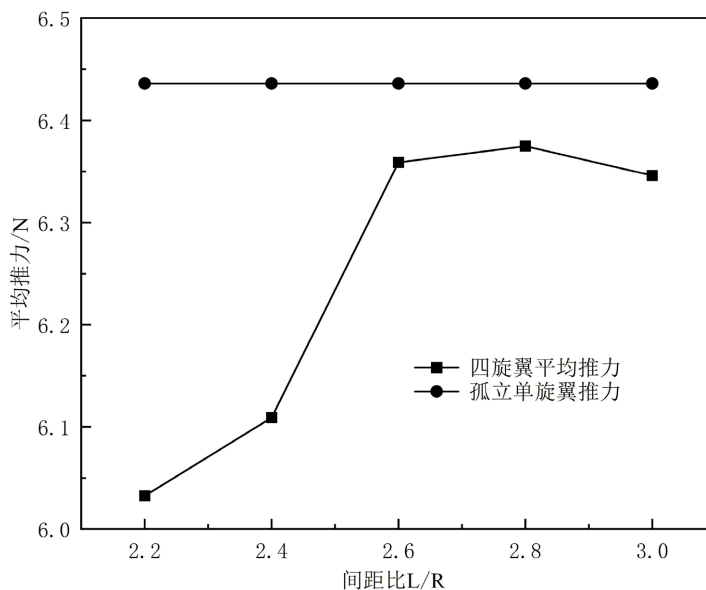


Figure 4. Average thrust comparison chart

图 4. 平均推力对比图

由图 4 可以看出，在相同转速条件下，单旋翼推力基本保持不变，大小约为 6.44 N，可作为四旋翼旋翼间干扰分析的参考基准。相比之下，四旋翼平均推力始终低于孤立单旋翼推力，表明四旋翼在悬停状态下存在明显的旋翼间气动干扰作用，相邻旋翼尾流相互影响会削弱单个旋翼的实际气动性能。

随着间距比由 2.2 增大至 3.0，四旋翼平均推力总体呈上升趋势。其中，当间距比较小时，四旋翼平

均推力明显低于孤立单旋翼推力,说明小间距条件下相邻旋翼下洗流交叠较强,尾流干扰作用显著,导致旋翼平均推力下降。当间距比由 2.2 增大至 2.6 时,四旋翼平均推力提升较为明显,说明适当增大旋翼间距能够有效减弱旋翼间气动干扰,改善四旋翼悬停气动性能。

当间距比继续增大至 2.8 和 3.0 时,四旋翼平均推力变化幅度明显减小,并逐渐趋于稳定。这表明随着间距进一步增大,相邻旋翼尾流交叠程度持续减弱,但其对推力提升的改善作用逐渐有限。也就是说,在本文研究范围内,适当增大旋翼间距有利于提高四旋翼平均推力,但当间距增大到一定程度后,继续增大间距对悬停气动性能的提升已不再显著。

由此可见,四旋翼悬停状态下旋翼间气动干扰会导致平均推力下降,而增大旋翼间距能够在一定程度上减弱干扰作用,使四旋翼平均推力逐步接近孤立单旋翼基准值。

### 3.2. 不同间距下平均扭矩变化规律

为分析不同旋翼间距对四旋翼悬停气动载荷的影响,将孤立单旋翼平均扭矩作为基准,对比相同转速下四旋翼平均扭矩的变化规律,如图 5 所示。

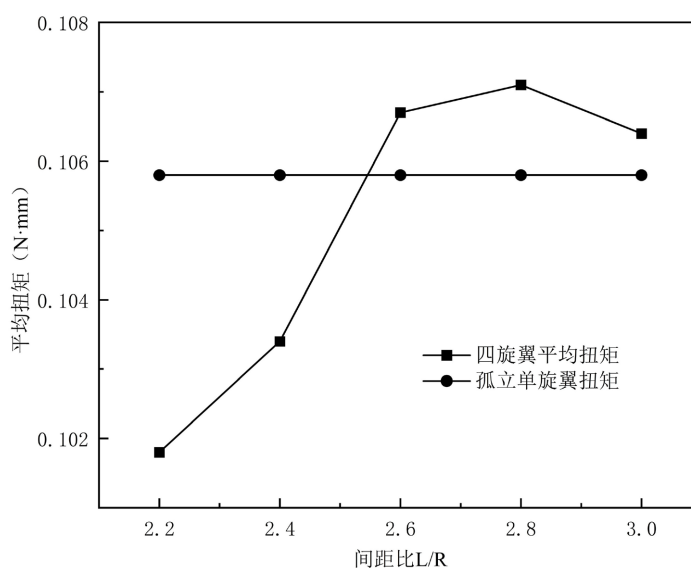


Figure 5. Average torque comparison chart

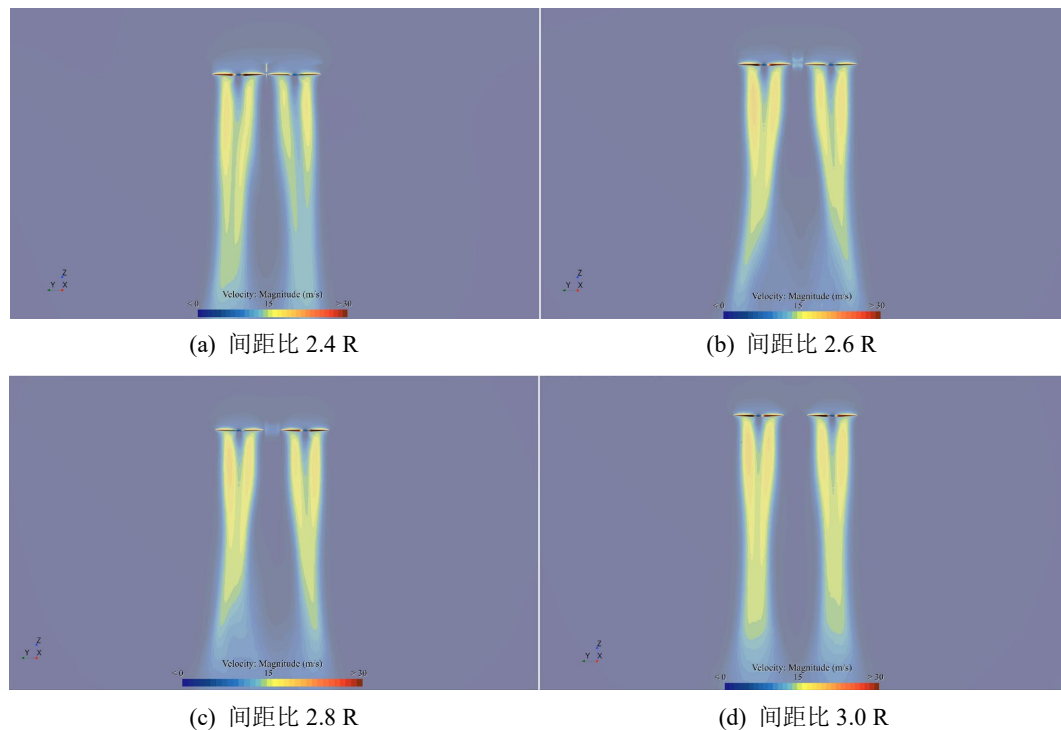
图 5. 平均扭矩对比图

由图 5 可知,孤立单旋翼平均扭矩基本保持稳定,约为 0.1058 N·m。四旋翼平均扭矩在  $L/R = 2.2$  和 2.4 时低于孤立单旋翼基准值,说明小间距条件下旋翼间气动干扰较强;随着间距比增大,四旋翼平均扭矩逐步增大,并在  $L/R = 2.6$  以上接近孤立单旋翼基准值,且变化趋于平稳。这表明适当增大旋翼间距有助于减弱旋翼间干扰对平均扭矩的影响,但当间距增大到一定程度后,其改善作用已不再显著。本文研究的是固定转速、固定桨型、固定  $L/R$  范围、稳态 MRF 悬停平均特性,因此表现为“增大后趋稳”;与文献 6 中的非单调规律差异,可能与构型、间距范围和求解方法有关。

## 4. 典型工况流场分析

### 4.1. 典型工况速度云图分析

为进一步分析不同旋翼间距条件下四旋翼悬停流场的变化特征,选取间距比分 2.4、2.6、2.8 和 3.0 的典型工况进行纵向截面。



**Figure 6.** Longitudinal section velocity cloud map of quadcopter at typical spacing  
**图 6.** 典型间距下四旋翼纵向截面速度云图

由图 6 可知, 在各工况下, 四旋翼桨盘下方均形成了较明显的高速下洗流区域, 说明悬停状态下旋翼诱导流主要集中于桨盘下方, 四旋翼流场的主要特征表现为典型的下洗流结构。同时, 相邻旋翼之间的中部区域均存在一定范围的低速区, 表明多旋翼系统中各旋翼尾流之间始终存在一定程度的相互干扰。

在 2.4 倍半径间距下, 尾流间的动量交换最为频繁。由于空间受限, 相邻下洗流在向下游发展的过程中互为激扰, 产生了强烈的卷吸与耦合现象。这不仅扩大了中间干扰区的范围, 也破坏了流场结构的对称性与规整性。

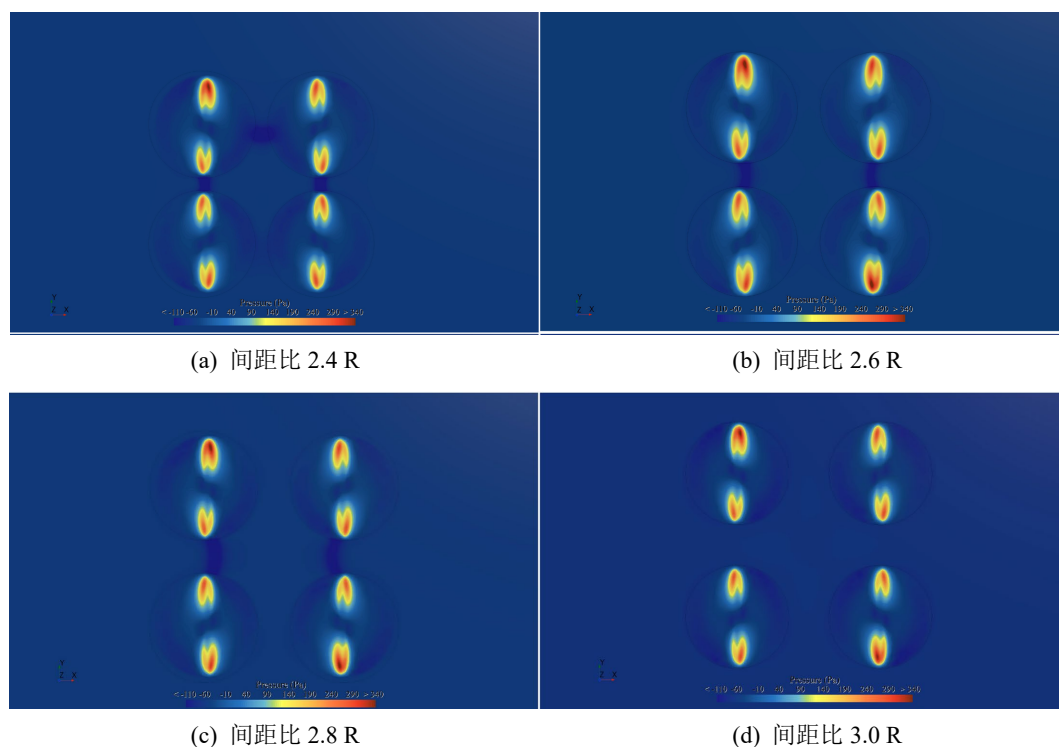
对比发现, 当间距比提升至 2.6 后, 气流交互的强度有所下降。下洗流的主结构变得更加凝聚, 边界层的剪切干扰减弱, 流场稳定性得到初步优化。这一转变说明, 间距的增加为尾流演化提供了更充足的空间, 削弱了能量损耗。

当间距比进一步增大到 2.8 和 3.0 时, 两侧旋翼下洗流保持了较好的独立性, 尾流边界更加清晰, 中部区域的低速干扰范围进一步减小, 整体流场分布更加规整。尤其是在 3.0 工况下, 四旋翼尾流结构已较为稳定, 说明在较大间距条件下, 相邻旋翼之间的尾流卷吸和耦合作用进一步减弱。

综合比较不同间距工况下的速度云图可知, 随着旋翼间距增大, 相邻旋翼下洗流之间的交叠程度逐渐减弱, 尾流边界逐步清晰, 四旋翼悬停流场分布趋于稳定。这表明适当增大旋翼间距有助于减弱旋翼间气动干扰, 从而改善四旋翼悬停状态下的流场结构。但从 2.8 到 3.0 的对比结果也可以看出, 当间距增大到一定范围后, 继续增大间距对流场改善的作用已相对有限, 这与前文平均推力和平均扭矩变化逐渐趋于平稳的规律基本一致。

#### 4.2. 典型工况下桨盘下方压力云图分析

为进一步分析不同旋翼间距条件下四旋翼桨盘近场压力分布特征, 选取间距比为 2.4、2.6、2.8 和 3.0 的典型工况, 对桨盘下方 5 mm 处的压力云图进行对比分析, 结果如图 7 所示。



**Figure 7.** Pressure cloud map at 5mm below the rotor disc with typical rotor spacing  
**图 7.** 典型旋翼间距下桨盘下方 5mm 处压强云图

由图 7 可知, 在各工况下, 四个桨盘下方 5 mm 处均形成了较明显的局部高压区域, 且高压区主要集中在各桨盘内靠近旋翼作用较强的位置。这表明桨盘下方近场压力分布主要受旋翼诱导流控制, 局部高压区与下洗流较强区域具有较好的对应关系。同时, 在相邻桨盘之间的中部区域仍可观察到一定范围的低压或弱压扰动区, 说明四旋翼悬停状态下各旋翼之间的局部压力场始终存在一定程度的相互耦合作用。

当间距比增大至 2.6 时, 各桨盘下方的高压区轮廓更加清晰, 局部压力分布相较于 2.4 工况更趋稳定, 桨盘之间中部区域的干扰有所减弱, 表明增大旋翼间距能够在一定程度上削弱旋翼间局部压力场的相互影响。

当间距比进一步增大到 2.8 和 3.0 时, 各桨盘下方高压区的分布趋于规整, 桨盘之间中部区域的扰动继续减弱, 整体压力场耦合程度相对降低。尤其是在 3.0 工况下, 四个桨盘下方的局部压力分布已较为稳定, 说明在较大间距条件下, 相邻旋翼之间的局部近场干扰进一步减弱。

综合比较不同间距工况下的压强云图可以看出, 随着旋翼间距增大, 桨盘下方近场压力分布逐渐趋于规整, 桨盘之间的局部压力耦合作用逐步减弱。这表明适当增大旋翼间距有助于改善四旋翼悬停状态下的局部压力场分布, 从而减弱旋翼间气动干扰。但从 2.8 到 3.0 的对比结果也可以看出, 当旋翼间距增大到一定范围后, 继续增大间距对压力分布改善的作用已相对有限, 这与前文平均推力和平均扭矩在较大间距下逐渐趋于稳定的变化规律基本一致。

## 5. MRF 稳态模拟方法的适用性与局限性讨论

### 5.1. MRF 稳态方法的适用性

本文采用多重参考系法(MRF)对四旋翼悬停状态下不同旋翼间距工况进行了数值模拟。MRF 方法通

将旋转区域视为相对静止的旋转参考系,在不显式追踪叶片瞬时运动的条件下实现对旋翼平均气动特性的求解。与非定常滑移网格方法相比, MRF 方法具有计算成本低、收敛速度快和工程应用便捷等优点,适用于多工况参数对比分析。

从本文的研究目标来看,主要关注不同旋翼间距条件下四旋翼系统的平均推力、平均扭矩以及典型流场分布规律,重点在于揭示旋翼间距变化对整体悬停气动性能的影响趋势,而非捕捉瞬时叶片通过效应、非定常载荷脉动或桨尖涡细节演化。因此,采用 MRF 稳态方法进行多组间距工况的对比研究具有较好的适用性。本文计算结果表明,不同间距条件下四旋翼平均推力、平均扭矩及典型速度场、压力场分布均表现出比较清晰的变化规律,说明 MRF 方法能够反映旋翼间距变化引起的主要气动特性差异。

此外,本文对计算残差及推力监视量进行了收敛监测,结果显示大部分工况下残差变化趋于稳定,平均气动参数收敛良好。结合四旋翼耦合工况下的网格无关性验证结果,可以认为所采用的 MRF 稳态方法能够满足本文对平均气动性能分析的基本需求。

## 5.2. MRF 稳态方法的局限性

虽然 MRF 方法在平均气动参数分析中具有较好的工程适用性,但其本质仍属于稳态近似处理方法,不能完整描述旋翼叶片真实旋转过程中的非定常流动特征。对于多旋翼系统而言,尤其是在旋翼间距较小时,相邻旋翼尾流之间可能存在较强的相互卷吸、局部回流以及相位相关干扰,此类现象具有明显的非定常特征,而 MRF 方法难以准确捕捉其瞬时变化过程。

具体而言, MRF 方法不能直接给出叶片通过引起的周期性载荷波动,也难以完整描述桨尖涡脱落、尾流演化及压力脉动等细节。因此,在小间距工况下,若旋翼间干扰显著增强,则局部流场可能对叶片瞬时位置和相对相位较为敏感,此时 MRF 结果更适合作为平均意义下的近似解,而不宜将其解释为瞬时真实流动结构。

本文在小间距工况下也观察到,局部受力和近场流动存在更强的敏感性,这从侧面说明在强干扰条件下,稳态 MRF 方法对瞬时细节的描述能力存在一定局限。因此,本文所得结论主要针对不同旋翼间距条件下平均气动性能的变化趋势,而不对小间距工况下的瞬时脉动特征作进一步定量展开。

## 5.3. 对本文结果可靠性的影响分析

结合本文研究目标与数值结果可以认为, MRF 稳态方法在本研究中对不同旋翼间距下的平均推力、平均扭矩以及典型流场结构的分析是有效的。尤其在中大间距工况下,各工况的平均推力和平均扭矩变化规律较为清晰,速度云图与压强云图也能够反映旋翼间干扰逐渐减弱的总体趋势,这说明 MRF 方法能够较好捕捉本文关注的主要规律。

同时也应指出,本文关于小间距工况的分析应理解为平均意义下的干扰规律判断,而不应过度外推为严格的瞬时流动结论。对于桨尖涡相互作用、瞬时载荷波动及相位相关干扰等更细尺度问题,仍需采用非定常方法作进一步研究。因此,本文的结论主要适用于四旋翼悬停状态下不同旋翼间距的平均气动性能比较,以及旋翼布局优化中的工程初步筛选。

## 6. 结论

(1) 基于 Simcenter STAR-CCM+建立了小型四旋翼悬停气动数值模型,采用 MRF 方法和 SST  $k-\omega$  湍流模型,对不同旋翼间距工况下的气动特性进行了分析。获得了不同间距条件下平均推力、平均扭矩及典型流场分布结果。

(2) 与孤立单旋翼相比,四旋翼悬停状态下存在明显的旋翼间气动干扰,小间距条件下四旋翼平均推力和平均扭矩均低于单旋翼基准值。随着旋翼间距增大,四旋翼平均推力和平均扭矩逐渐增大,当  $L/R$

由 2.2 增大至 2.6 时, 平均推力和平均扭矩提升较明显; 当 L/R 继续增大至 2.8~3.0 时, 其增幅减小并逐渐趋于稳定, 说明适当增大旋翼间距有助于减弱旋翼间气动干扰, 改善四旋翼悬停气动性能。

(3) 典型工况下的速度云图和桨盘下方 5 mm 处压强云图表明, 随着旋翼间距增大, 相邻旋翼尾流交叠逐渐减弱, 流场结构和局部压力分布趋于规整, 桨盘之间的局部耦合作用有所降低。但从 L/R=2.8 到 3.0 的对比结果可知, 继续增大旋翼间距后的改善幅度已相对有限。需要指出的是, 本文结论主要针对 MRF 稳态方法下的平均气动性能比较结果, 适用于不同旋翼间距条件下的工程趋势分析。

## 参考文献

- [1] 刘雪松, 昂海松, 肖天航. 悬停状态旋翼间干扰对四旋翼升力影响分析[J]. 航空工程进展, 2014, 5(2): 148-153.
- [2] 齐书浩, 刘素娟, 张文明, 肖心想. 低雷诺数下微型四旋翼飞行器气动和振动特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(5): 53-57.
- [3] 王策, 唐正飞, 徐培, 黄凯. 四旋翼无人机流场及气动干扰数值模拟研究[J]. 飞行力学, 2018, 36(4): 83-87.
- [4] 张宏乐, 钱建平, 郭淳, 苏文杰. 悬浮弹多旋翼悬浮装置翼间气动干扰特性分析[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(7): 25-29.
- [5] Hwang, J.Y., Jung, M.K. and Kwon, O.J. (2015) Numerical Study of Aerodynamic Performance of a Multirotor Unmanned-Aerial-Vehicle Configuration. *Journal of Aircraft*, **52**, 839-846. <https://doi.org/10.2514/1.c032828>
- [6] Shukla, D. and Komerath, N. (2018) Multirotor Drone Aerodynamic Interaction Investigation. *Drones*, **2**, Article 43. <https://doi.org/10.3390/drones2040043>
- [7] 雷瑶, 王恒达, 叶艺强, 黄宇晖. 微型四旋翼飞行器最佳旋翼间距布局研究[J]. 计算力学学报, 2020, 37(4): 412-416.
- [8] 李碧森, 史春景, 郝永平, 徐九龙. 不同旋翼间距的微型无人机旋翼气动性分析[J]. 沈阳理工大学学报, 2023, 42(5): 62-67.
- [9] 伍咏成, 陈自力, 季近健. 一种倾转四旋翼无人机气动特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 41(3): 72-75.
- [10] 赵俊, 李志彬. 变距四旋翼飞行器气动力及噪声特性计算研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(4): 57-66.
- [11] 李鹏, 招启军. 悬停状态倾转旋翼/机翼干扰流场及气动力的 CFD 计算[J]. 航空学报, 2013, 35(2): 361-371.
- [12] 刘聪, 魏志强, 韩红蓉, 单泽众. 侧风作用下无人机旋翼悬停状态气动响应分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(9): 106-112.
- [13] 林沐阳, 招启军, 赵国庆. 基于滑移网格的倾转旋翼机全机干扰流场研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(1): 100-108.