



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jweia

四旋翼无人机飞行 CFD 模拟方法论的评估

C. 帕斯, E. Suañez*, C. 吉尔, J. 文斯

CINTECX, 维戈大学, 阿萨拉斯-马科森德校区, 西班牙维戈 36310

文章信息

关键词: 无人机
四旋翼
空气动力学
计算流体动力学
多重参考系
滑动网格
推力
地面效应

摘要

计算流体动力学 (CFD) 模拟在现代无人机 (UAV) 的开发中越来越受到关注, 但关于四旋翼无人机以及螺旋桨产生的流动特性的研究却很少, 而流动特性决定了推力容量。因此, 本研究的目的是评估最有前景的方法 (多重参考系 (MRF) 和滑动网格) 在三维流动模拟中的性能。此外, 还考虑了地面接近的影响。对于单个螺旋桨的结果显示, 在地面效应的评估方面, 两种模型是等价的, 尽管在推力量化方面观察到明显的偏差。对于四旋翼无人机, 叶片与框架之间的相对位置被证明是一个关键因素。因此, 在 MRF 情况下, 当最小化叶片与机身臂的重叠时, 获得了相似的推力变化率。然而, 在任何模拟位置, 推力大小至少相差 11%。假设这种偏差, MRF 显著降低的计算成本使该模型成为一个非常有吸引力的选择。最后, 还评估了相对叶片间距在滑动模拟中的影响。

1. 引言

在过去几年中, 无人驾驶飞行器 (UAV) 的使用在广泛的军事、工业和民用应用中变得越来越普遍 (Bäckman 等人, 2018 年; 蒋等人, 2019 年; 埃斯特拉达和恩多马, 2019 年)。这些飞行器的通用性源于其在尺寸和平台设计方面的多样形态, 这使得它们能够适应各种情况的要求。固定翼飞行器更适合在开阔环境中进行长距离飞行 (孔托吉安尼斯和埃卡特纳里斯, 2013 年; 布拉沃-莫斯奎拉等人, 2017 年; 帕尼奥特等人, 2018 年), 而多旋翼飞行器则因其简单性、可操作性和垂直起飞的能力, 在开阔或封闭空间内执行短期任务方面表现出色。然而, 许多此类任务涉及在墙壁或地面附近飞行, 例如表面检查和货物交付, 由于众所周知的地面效应, 这对这些飞行器的稳定性构成了挑战。

根据叶素理论, 地面效应意味着飞行器所经历的有效推力增加。当接近地面时, 叶片产生的向下流动受到更多阻碍, 因此诱导速度降低。这种现象在传统直升机领域得到了广泛研究

, 并得出了量化单个螺旋桨推力变化的数学表达式。最广泛接受的模型是切斯曼和贝内特 (1955 年) 开发的模型, 该模型仅涉及螺旋桨的半径和到地面的距离作为参数。基于其简单性, 许多其他研究人员使用该模型来比较他们的结果 (约翰逊, 1980 年; 鲍尔斯等人, 2013 年; 沙尔夫等人, 2014 年), 并提出了类似的表达式 (海登, 1976 年)。

然而, 这些单螺旋桨模型没有考虑在多旋翼发展中变得非常重要的设计方面, 例如: 使用锥形机翼、广泛的转速范围, 甚至旋翼数量。Deters 等人 (2017 年) 针对不同的商用螺旋桨对旋翼几何形状和转速的影响进行了实验研究。结果表明, 无量纲推力随转速的增加而增加, 在某些情况下, 从大约 5000 转/分钟的特定速度起保持稳定。关于旋翼数量, 多项实验揭示了单个螺旋桨产生的流动与多旋翼产生的流动之间的差异, 其中四旋翼飞行器是最受评估的设计。在这方面, Bernard 等人 (2017 年) 开展了一项实验活动, 使用半径为 0.1524 米的旋翼和间距为 550 毫米的十字形四旋翼飞行器。

* Corresponding author. E-mail address: suarez@uvigo.es (E. Suñez).

<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104776>

Received 18 June 2021; Received in revised form 7 September 2021; Accepted 8 September 2021
Available online 15 September 2021

0167-6105/© 2021 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

转子轴。孤立螺旋桨的结果与经典模型相当吻合，尤其是切斯曼和贝内特公式，在大约 $H/R < 2$ 时，地面效应明显。相反，在四旋翼飞行器中，这种效应延伸到 $H/R < 4$ 。康扬斯等人（2018年）在对使用 Gemfan 9x4.7 尼龙螺旋桨的定制四旋翼飞行器的分析中得出了类似的结论，并测试了转子之间的几个距离。单个孤立螺旋桨的推力曲线与理论模型非常吻合，只有在雷诺数敏感范围内运行时才会发现微小的差异。然而，在四旋翼飞行器的评估中观察到显著的变化。在这种情况下，在大约 $H/R = 4$ 时，推力显著增加，随后减少到在 $1.5 < H/R < 2$ 范围内达到最小值。这个最小值与被称为涡环状态的影响有关。因此，这些研究的结果表明，经典模型不能准确预测四旋翼飞行器的地面效应。作为一种近似方法，一些作者提出使用基于单个旋翼面积总和的等效半径（Bangura 和 Mahony, 2012）或基于特定实验数据的参数（Danjun 等人, 2015）来调整 Cheeseman 和 Bennett 的模型，但其普遍适用性仍有待证明。同样，Sánchez-Cuevas 等人（2017）提出了一种将势流与镜像法相结合的模型来预测四旋翼飞行器受到的地面效应，与他们自己的实验结果吻合良好。该模型基于几何参数，并包含一个带有经验系数的机身升力项。基于算法且考虑墙壁存在以评估四旋翼飞行器所受力的更复杂模型也已被提出（Gao 等人, 2019; He 和 Leang, 2020; McKinnon 和 Schoellig, 2020）。

如前所述，由于涉及变量众多以及它们之间的相互作用，评估四旋翼飞行器中与地面效应相关的空气动力学特性是一项具有挑战性的任务。在这方面，其他研究技术，如风洞试验（Schiano 等人, 2014 年; Tomic 等人, 2016 年; Smeur 等人, 2018 年）或数值模拟，已成为有前景的替代真实规模实验测试的方法。更具体地说，在文献中已经发现了几个计算流体动力学（CFD）模拟的例子。在这方面，主要目标是正确重现由旋翼产生的流场。为此，采用了不同的方法：Kang 和 Sun（2000 年）在二维分析中向纳维-斯托克斯方程添加了源项来表示旋翼叶片；Raza 等人（2017 年）对建筑尾迹进行了 LES 模拟，并将结果与典型四旋翼飞行器控制方法的数学模型相结合，以评估其性能；Kaya 和 Ozcan（2013 年）对零厚度旋翼采用了风扇边界条件。尽管如此，这些方法都无法重现由转子产生的 3D 流动，因为它们没有考虑叶片和体坐标系的特定几何形状。相反，这些方法将预先获得的术语分配给流动，或者施加一个均匀的向下速度。在这方面，只有两种方法允许对特定叶片以一定速度旋转时产生的实际 3D 流动进行建模，即使用多个参考系（MRF）和使用滑动网格。前者是通过将旋转分量分配给流体单元的速度向量来对流场进行稳态建模。由于螺旋桨的旋转在流动方程中强制施加，并且不需要瞬态模拟，因此相关的计算成本相对较低。这种方法已被斯塔朱达等人（2016 年）应用于单个孤立螺旋桨的模拟中，以评估叶片周围计算域的最佳尺寸。库蒂和拉杰德兰（2017 年）在他们的单螺旋桨和不同自由流速度的模拟中也使用了 MRF 模型，与实验结果吻合良好，尤其是在低推进比的情况下。另一方面，在 CFD 模拟中，使用滑动条件和非拟合界面来产生域之间的相对速度是一种常见做法。与 MRF 不同，这种方法需要在每个时间步长更新网格，并求解瞬态问题，这大大增加了计算时间和成本。在该领域

张等人（2020 年）和朱等人（2015 年）的研究采用了这种方法来评估风力涡轮机叶片的性能。然而，在文献中，将滑动网格应用于四旋翼飞行器的情况较少见。尽管如此，米西奥洛夫斯基等人（2019 年）在评估四旋翼飞行器在侧向飞行中的流动时使用了这种方法，包括交叉和加法两种配置。考虑的速度为 10 米/秒，俯仰姿态为 5 度，并且不包括无人机机身和机臂。结果显示，在交叉配置中产生的升力有所下降，尤其是在后旋翼中，而在加法一配置中，这种升力通常有所增加。此外，将单个螺旋桨的模拟与实验值进行验证，在推力测量方面显示出良好的一致性。

基于对四旋翼飞行器 CFD 模拟领域现有技术的修订，本文旨在比较和对比实现真实螺旋桨产生的流动三维建模的现有方法：MRF 和滑动网格。主要关注点在于评估每种方法如何重现流场以及四个产生的流动之间的相互作用，并量化施加在四旋翼飞行器上的推力。此外，还确定了两种方法在接近地面时的效果，模拟了从四旋翼飞行器到地面的各种距离。一般来说，滑动网格计算被认为更稳健，能产生更有意义的结果，但与 MRF 相比，计算成本显著增加（ANSYS, 2016）。因此，评估两种模型在四旋翼飞行器的特定条件下的性能，测量推力量化的差异，并确定在哪些情况下 MRF 是更值得选择的选项，考虑到其计算成本较低，将是一个有趣的问题。因此，本文分为四个部分。在第一部分（第 1 节）的介绍之后，在第 2 节中描述了四旋翼飞行器机身和旋翼的几何模型；给出了每次模拟所采用的计算方法和边界条件；并详细说明了所使用的网格。接下来，在第 3 节中展示了研究的主要结果并进行了讨论。最后，在第 4 节中总结了研究的结论。

2. 材料与方法

2.1. 几何模型

本研究选择的几何模型是 DJI Phantom 3 的简化版本（DJI-Team, 2021）。原始的四旋翼飞行器由一个带有四个旋翼的十字形机身组成，并包括一个摄像头、一个摄像头支撑组件和两个支撑腿（见图 1（a））。先前的模拟已经证明这些配件对推力测量有一定影响。因此，在本研究中，机身的下部（摄像头、摄像头支撑和支撑腿）被忽略，以避免考虑其对结果的影响（见图 1（b））。

关于螺旋桨，图 1(c) 所示为草图，图 1(d) 描述了沿半径（中心到尖端）的弦长和扭转角度的变化。这些尺寸与原始叶片几何形状的轮廓相对应。

2.2. 数值方法与边界条件

在本研究中，采用了不同的模拟设置组合，分别评估了以下每个因素在流场重现和推力量化中的效果：

- 几何模型：单螺旋桨、四旋翼。
- 旋转方法：磁流体动力学（MRF）、滑动网格。
- 距地面距离：基于 H/R 值。

这些设置在图 2 中有所概述，并在本节中进行了说明。

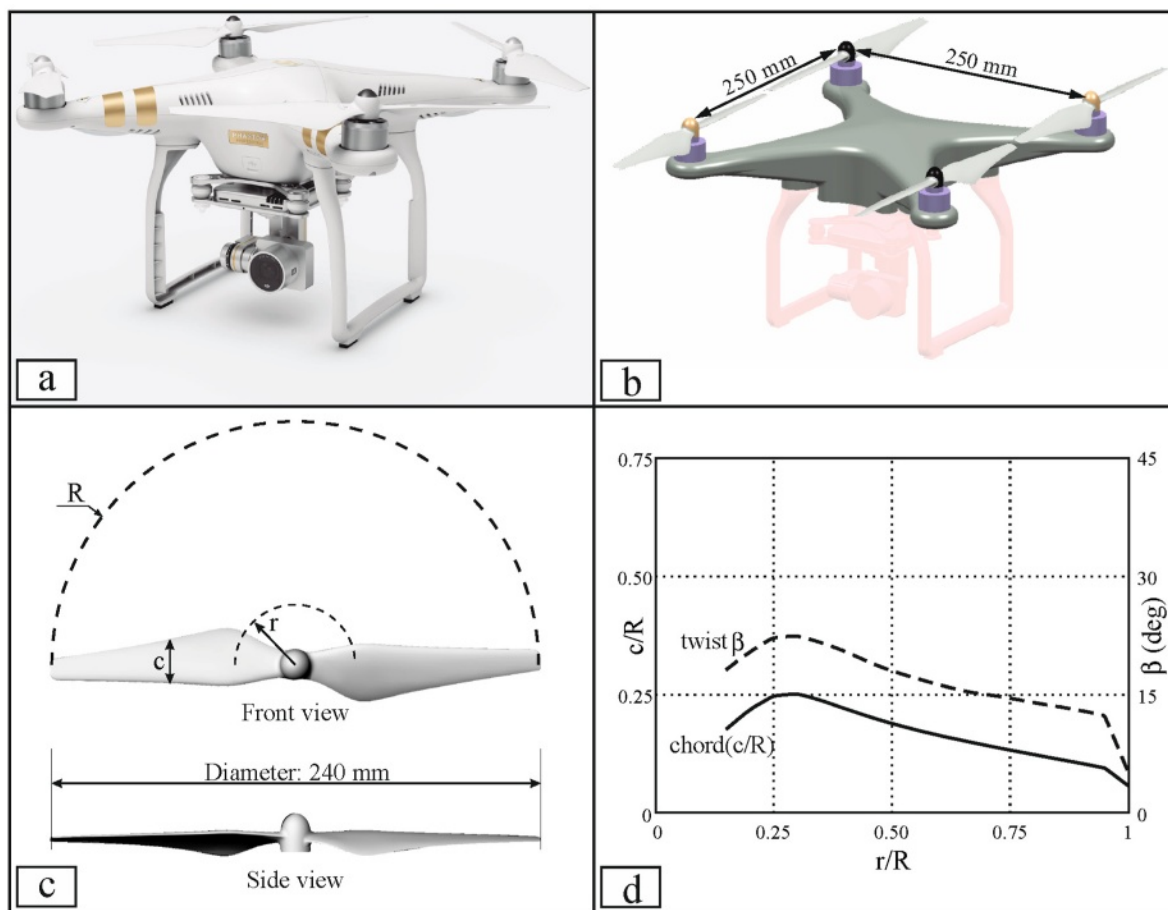


图1.大疆幻影3的几何形状: (a) 原始的, (b) 计算机辅助设计模型, (c) 螺旋桨草图, (d) 螺旋桨尺寸。

首先, 采用图2(a)所示的策略来评估MRF和滑动法在重现由单个螺旋桨旋转产生的流动方面的性能。这种情况此前已通过计算方法 (Paz等, 2020) 以及理论模型 (Cheeseman和Bennett, 1955; Hayden, 1976) 进行了分析, 这有助于验证数值过程, 并更广泛地比较这两种方法及其与地面效应的关系。

随后, 使用简化的大疆幻影3四旋翼飞行器模型 (图2(b)和(c)) 对这些旋转方法进行了评估。两个模型具有相同的几何模型、计算域、网格和边界条件, 唯一的区别在于用于重现叶片产生的流动的方法。与单个螺旋桨 (图2(a)) 相比, 四个旋翼同时旋转的组合代表了一种完全不同的情况, 其中每个螺旋桨产生的流动都会受到其他螺旋桨存在的影响。此外, 这种流动在整个旋转周期中并不是稳定和恒定的, 而是随着螺旋桨相对于无人机臂的相对位置而显著变化。此外, 假设每个螺旋桨相对于其他螺旋桨的相对位置也会对四旋翼飞行器所经历的推力产生显著影响。

关于MRF模型, 标记为“MRF域”的圆柱形区域 (见图2(b)) 包含现实中移动的叶片表面, 这些叶片负责产生推动无人机的涡旋管。然而, 这种方法考虑了一个静态区域 (因此是一个稳定的叶片), 并通过向每个表面单元的速度向量分配一个旋转分量来模拟旋转, 该分量是距离旋转轴的距离的函数。因此, 旋转速度的影响传递到整个MRF域, 并通过允

许流体通过的一对界面传递到全局流体域, 重现实际产生的瞬时流动。因此, MRF通常被称为“冻结转子方法” (ANSYS, 2016)。由于域内的壁面是静态的, 每个叶片相对于机身臂和彼此之间的位置非常重要。为了评估这种影响, 模拟了5种不同的模型 (MRF - A到MRF - E)。模型A、C和D对应于特定的位置, 在这些位置中, 四个旋翼相对于臂的相对位置相同。相反, 在情况B和E中, 每对相反的螺旋桨都相互垂直。这种方法的特性使得模拟能够以稳定的方式进行, 从而降低了计算要求。

另一方面, 基于“滑动域”的方法如图2(c)所示。在这种情况下, 对包含螺旋桨的圆柱区域和剩余流体的界面应用滑动条件。这样, 滑动域的网格实际上相对于全局域以指定的速度旋转, 进而螺旋桨的叶片壁面也随之移动。因此, 由于螺旋桨固体壁面的存在, 流体单元的速度矢量会发生修改, 真实地重现向下流的产生。与MRF模型不同, 这种滑动方法需要瞬态模拟, 网格的运动是根据旋转速度和时间步长计算得出的。选择时间步长的标准是保证叶片在每一步中不跨越超过一个单元, 保持CFL数小于1。因此, 时间步长取决于螺旋桨半径和网格大小。

所有策略也被用于评估地面接近对单螺旋桨和无人机飞行的影响。为此, 螺旋桨/无人机与地面的距离逐渐减小。这使得能够评估流动特性。