

基于 CFD/CSD 强耦合的复合翼 eVTOL 流固耦合数值仿真与气动弹性机理研究

连少钦

芜湖职业技术大学, 安徽 芜湖 241006

DOI:10.61369/ME.2026040003

摘 要 : 复合翼电动垂直起降飞行器 (eVTOL) 因其高安全性和巡航效率成为低空经济城市空中交通的主要形式, 其通常使用轻质复合材料制成的柔性机翼, 在转段过程中存在旋翼下洗流与柔性机翼强烈相互作用问题, 极易诱发颤振和极限环振荡等气动弹性问题, 传统解耦仿真方法难以捕捉非线性强耦合特性。本文针对复合翼 eVTOL 建立了基于 CFD/CSD 分区强耦合数值仿真的框架, 基于重叠网格技术模拟了旋翼旋转运动, 并结合分离涡模拟 (DES) 湍流模型, 开展了全飞行工况下的流固耦合分析, 通过对刚性机翼及柔性机翼气动参数、结构变形对比, 揭示了转段过程中的涡-翼耦合干扰机制以及结构刚度、过渡速率对气动弹性稳定性的影响。结果表明: 柔性机翼最大形变出现在转段中后期, 其翼尖最大位移可达 8.72 mm, 与刚性机翼相比, 升力系数波动增加 12.6%; 由旋翼滑流引发的非定常气动载荷是引起机翼振动失稳的主要原因。研究可为复合翼 eVTOL 轻量化设计和气动弹性控制以及飞行安全边界划定提供参考。

关 键 词 : 复合翼 eVTOL; CFD/CSD 强耦合; 流固耦合; 数值仿真; 气动弹性

Research on Fluid-Structure Interaction Numerical Simulation and Aeroelastic Mechanism of Compound-Wing eVTOL Based on CFD/CSD Strong Coupling

Lian Shaoqin

Wuhu Vocational Technical University, Wuhu, Anhui 241006

Abstract : Compound-wing electric Vertical Take-Off and Landing (eVTOL) aircraft have emerged as the primary form of urban air mobility in the low-altitude economy due to their high safety and cruise efficiency. These aircraft typically employ flexible wings made of lightweight composite materials, which encounter intense interactions between rotor downwash and flexible wings during transition phases, making them highly susceptible to aeroelastic issues such as flutter and limit cycle oscillations. Traditional decoupled simulation methods struggle to capture the nonlinear strong coupling characteristics. This paper establishes a framework for CFD/CSD partitioned strong coupling numerical simulation tailored for compound-wing eVTOLs. By utilizing overset grid technology to simulate rotor rotation and integrating the Detached Eddy Simulation (DES) turbulence model, a fluid-structure interaction analysis is conducted across the entire flight envelope. Through comparative analysis of aerodynamic parameters and structural deformations between rigid and flexible wings, the vortex-wing coupling interference mechanism during transition phases, as well as the influence of structural stiffness and transition rate on aeroelastic stability, are revealed. The results indicate that the maximum deformation of the flexible wing occurs in the mid-to-late transition phase, with a maximum wingtip displacement of 8.72 mm. Compared to rigid wings, the lift coefficient fluctuations increase by 12.6%. Unsteady aerodynamic loads induced by rotor slipstream are identified as the primary cause of wing vibration instability. This research provides valuable insights for lightweight design, aeroelastic control, and flight safety boundary determination of compound-wing eVTOLs.

Keywords : compound-wing eVTOL; CFD/CSD strong coupling; fluid-structure interaction; numerical simulation; aeroelasticity

基金项目:

本文系芜湖职业技术大学基金项目, 基于复合翼 eVTOL 流固耦合的数值仿真研究 (项目编号: wzdzt202632) 的阶段性研究成果;

本文系芜湖职业技术大学基金项目, 芜湖市通用航空器维修技术研发中心 (项目编号: WHSYFZX202401) 的阶段性研究成果。

作者简介: 连少钦 (1999.03—), 男, 汉族, 福建泉州人, 学历: 大学本科, 职称: 助教, 研究方向: 无人机、低空飞行器、eVTOL。

引言

低空经济是新质生产力的重要组成部分，带动了城市空中交通（UAM）的快速发展，电动垂直起降飞行器已成为航空领域的研究热点。复合翼 eVTOL 结合多旋翼升力系统与固定翼巡航机构，兼具垂直起降的安全性和巡航飞行效率，具有巨大的商业化应用前景。然而其多运动部件耦合、轻质柔性结构以及非定常干扰流场的特点，使该类飞行器在转段飞行过程中，由于旋翼涡系和机翼流场相互干扰，气动载荷与结构变形构成一个闭环耦合，极易引发气动弹性失稳现象。当前国内外对 eVTOL 气动性能的研究主要针对单一方面的分析，而对复合翼型强非线性流固耦合的高保真仿真研究较少，传统的半经验模型、单向耦合仿真无法精准捕捉瞬态耦合响应。为此，本文构建 CFD/CSD 强耦合体系，优化分区耦合迭代算法，量化分析流固耦合下飞行器气动特性和结构动态响应，揭示气动弹性的演化机制，为复合翼 eVTOL 工程化设计和适航验证提供理论基础。

一、复合翼 eVTOL 仿真模型和数值方法

（一）几何模型与网格划分

本文选取一款在行业中广泛应用的典型的升力巡航复合翼 eVTOL 为仿真对象，该构型因采用将升力旋翼和巡航机翼相互分离的设计而成为现阶段实现商业化研发的主力机型。其整机包含 4 组分布式垂直升力旋翼，平直固定翼、流线形机身和后置安定尾翼，整个机体的长度为 5.2 m，展长为 6.8 m，所选 eVTOL 机翼为航空轻质碳纤维材料制成，展弦比为 6.2，合理的展弦比能有效减少诱导阻力，整体构型兼顾载重能力与续航能力以及飞行效率。为同时保证计算的精度和计算量，在文中选择行业通用的分区网格策略，将整个计算域分为四个旋转域和一个整机域，考虑到旋翼高速转动时，其内部的气流梯度变化较大，且涡结构复杂，在旋翼区域使用了加密贴体网格，边界层高度严格控制在 0.02 mm，能够很好地捕捉到机翼近壁面粘性底层流动，满足低雷诺数湍流需求^[1]。为了避免网格数量较少带来的误差，同时避免出现不必要的算力浪费，进行了网格无关性验证，如表 1 所示，综合考虑计算时间、计算结果的收敛精度以及成本问题，最后确定本次数值计算网格总量为 186.4 万。

表 1 网格无关性验证结果

网格数量 / 万	升力系数	阻力系数	单步计算耗时 / min
125.7	0.842	0.071	12.5
186.4	0.865	0.068	18.3
248.2	0.867	0.067	25.6

（二）CFD/CSD 强耦合数值算法

本次数值模拟采用较为成熟的 CFD/CSD 耦合求解方法，流体场与结构场双向同步求解。基于 ANSYS Fluent 软件对流体场进行求解，DES 分离涡模拟湍流模型结合了 RANS 和 LES 模型的优点，可以很好地捕捉到旋翼在旋转过程中产生的分离涡、尾涡及涡脱等结构，适用于旋翼多尺度涡干扰流动的特点。通过重叠网格法对旋翼高速周期性运动进行模拟，可以无间断地展现旋翼滑流的挤压、偏转以及脱落的整个过程^[2]。压力速度耦合选用更为稳定的 SIMPLEC 算法，动量项采用二阶迎风格式离散求解，有效地减少了数值弥散及截断误差，提高了流场计算精度。基于有限元法建立柔性机翼动力学方程，在此文中复合材料机翼的参数已

知，弹性模量为 42 GPa，泊松比为 0.31，密度为 1.85 g/cm³，材料参数参照实际航空复合材料参数。针对强耦合迭代过程中容易发散，收敛慢的问题，采用 Aitken 动态松弛优化后的分区强耦合方法，在单步物理时间中进行了 3 ~ 5 次子迭代，实现了流体域的压力载荷与结构域的位移形变的双向实时传递，严格保证了耦合交界面力与位移的收敛精度^[3]。

（三）仿真工况设置

复合翼 eVTOL 在起飞到巡航过程的转段阶段气流扰动较大，流动高度非线性，存在旋翼与机翼涡系强耦合的情况。其作为飞行器飞行过程中的高危工况之一，也是极易发生气动弹性失稳问题的一个区间。本文根据国际标准大气条件设置仿真环境（101.325 kPa, 288.15 K），模拟贴近于低空飞行的常温常压下的真实大气环境，避免气象参数的干扰。通过考虑飞行器实际的转段逻辑选择三种有代表性的飞行工况如表 2 所示，分别对应起飞过渡阶段的初始、中间和末期时刻，完整体现了飞行过程中来流速度逐渐增大、旋翼转速减小以及攻角平缓地减小的过程。为了更加直观地体现结构弹性对整个飞行器气动特性的影响，本文基于相同的几何模型、相同的流场边界条件下建立了两种计算模型：刚性机翼和柔性机翼进行了对比分析。采用控制单一变量的方式对机翼的弹性结构对飞行器气动流场及载荷波动特性以及稳定性的影响进行准确分析^[4]。

表 2 仿真计算工况参数

工况编号	飞行状态	来流速度 / (m · s ⁻¹)	旋翼转速 / (r · min ⁻¹)	飞行攻角 / (°)
1	转段初期	6	1850	8
2	转段中期	12	1520	5
3	转段后期	18	1180	3

二、仿真结果与气动弹性机理分析

（一）流场涡系干扰特性分析

为揭示复合翼 eVTOL 转段过程内部流动规律，对全工况流场云图、涡结构分布进行了提取分析。仿真结果表明，在复合翼 eVTOL 转段过程中高速旋转的旋翼不断地向下喷射高速下洗流，持续地冲击固定翼表面，形成多尺度、非定常的复杂涡系结

构（包括翼尖涡、附着涡、旋翼尾涡等），涡系演化特征直接决定整机气动干扰强度和流动稳定性^[9]。转段初期由于旋翼处于较高转速状态，下洗流流动速度较大，高速撞击机翼前缘形成较明显的逆压梯度，边界层发生剥离并诱发局部气流分离，在机翼上表面生成一个稳定的附着涡；转段中期由于旋翼转速与来流速度匹配程度最高，气动耦合关系最为复杂，涡系耦合作用达到最强，此时旋翼脱落尾涡与机翼表面脱体涡相互挤压、缠绕、融合，其涡核最大流速可达 26.8 m/s，湍流脉动强度明显增大，流动紊乱程度达到全阶段最大值；转段后期随着旋翼转速不断降低而来流速度逐渐增大，旋翼诱导下洗能量也不断地减弱，涡系在对流作用下被逐步拉伸、破碎、耗散，流动开始趋于稳定。为进一步说明结构对流场的干预效应，对比两类机翼流场可知，刚性机翼无变形限制，机翼表面曲率保持不变，涡系脱落频率稳定均匀，流动特性鲜明；柔性机翼受到交变气动载荷激励，弯曲扭转变形并反向压迫周围流体区域，改变局部流场流通路径，使得涡系出现空间偏移及脱落时序混乱现象，流场脉动特性增强，强化了流场非线性流动特征。

（二）结构形变及振动分析

从表3给出的三种工况下柔性机翼结构动力学响应结果来看，包括弯曲位移、扭转变形以及振动频率和等效应力。由于根部固支约束导致机翼根部约束刚度大，变形受到严格限制，机翼整体形变表现出典型的由小到大的悬臂梁式的分布趋势，符合航空薄壁机翼受力变形特点。转段中期流固耦合干涉作用最强，涡翼干扰叠加效应最大，气动交变载荷幅值达到最大，此时机翼翼尖最大弯曲位移达到了 8.72 mm，并伴有 0.42° 的扭转变形，机翼扭转弯曲变形明显，结构受力最恶劣；转段后期飞行姿态日趋平稳，旋翼下洗影响逐步衰减，气动载荷幅值逐渐回落，机翼结构形变量随之减小，结构应力水平明显下降。为判断机翼振动安全状况，对机翼振动时域信号做频谱分析得到机翼振动主频集中在 12 ~ 18 Hz，与机翼低阶弯曲模态固有频率高度重合，飞行过程中极易诱发微小共振现象，在交变载荷长期循环往复作用下，机翼易产生疲劳累积损伤，长此以往会降低结构安全裕度，甚至可能诱发颤振失稳，是复合翼 eVTOL 在转段飞行过程中不可忽视的安全问题^[9]。

表3 柔性机翼结构形变与力学参数

工况编号	最大弯曲位移 /mm	最大扭转角 / (°)	振动主频 / Hz	结构等效应力 /MPa
1	5.36	0.25	14.2	18.65
2	8.72	0.42	16.5	27.32
3	4.15	0.18	12.8	15.48

（三）气动参数对比分析

结构弹性显著影响飞行器气动载荷波动特性，刚性和柔性机翼在相同来流条件下的气动响应差异巨大。危工况2下，刚性机翼结构固定不变，表面光滑无变形，气流稳定附着于壁面，流动分离轻微，结构气动稳定性较好，平均升力系数为 0.857，载荷波动幅度小（3.2%）；柔性机翼因弹性变形导致机翼表面曲率在交变载荷下实时变化，机翼表面气流进一步加剧分离现象，尾迹回流范围增大，平均升力系数减小为 0.831，载荷波动幅度增加至 15.8%，较刚性机翼提高 12.6%。机翼弹性形变持续改变其表面附着气流状态，拓宽机翼表面气流分离区段，使得机翼表面气流回流更加明显，尾涡脱落无序性增大，从而引起整机阻力系数小幅升高；周期性的弹性形变引起升力高频振荡，振荡载荷传导至机身引发低频俯仰振动，恶化飞行姿态的稳定性。由流场演化和结构变形数据分析可知旋翼非定常滑流扰动诱发了气动载荷的波动，柔性结构进一步放大流场扰动幅值，流场扰动与结构变形相互正激励，形成“气流干扰—结构形变—流场畸变”的恶性循环，极大加剧了飞行器气动弹性失稳风险。

三、结论与展望

（一）研究结论

本文采用 CFD/CSD 强耦合方法构建仿真分析框架，对复合翼 eVTOL 转段飞行全过程进行流固耦合仿真，揭示了气动弹性演变机制，得到以下结论：首先，转段中期为最不利气动弹性工况，涡系干扰最为严重，柔性机翼的最大翼尖位移达到 8.72 mm，存在结构应力集中问题；其次，结构柔度将增大气动参数波动程度，与刚性机翼相比，升力最大振幅增加了 12.6%，容易引起飞行姿态振荡；最后，旋翼转速和飞行速度决定了流场涡系的强度，涡翼干涉引起的非定常载荷是导致气动弹性失稳的主要原因。

（二）不足与展望

本文忽略了温度和湍流等环境因素的影响，且没有进行实物试验，仿真数据存在一定的局限性。后续工作可优化耦合算法，增加主动控制模块，构建气-固-控联合仿真平台；结合风洞试验修正仿真模型，完善复合翼 eVTOL 气动弹性数据库，为飞行器结构优化设计、适航认证和低空经济产业化发展提供技术支持。

参考文献

[1] 李根生. 典型 eVTOL 飞行器构型及推进系统设计方法综述 [J]. 桂林航天工业学院学报, 2025, 30 (05): 707-722.
[2] 陈修贤, 姚远, 张宝柱, 董明. 复合翼 eVTOL 推力单元安装散热一体化设计 [J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53 (08): 49-52.
[3] 于晓东. 基于用户体验的低空旅游 eVTOL 载人飞行器设计研究 [D]. 江南大学, 2024.
[4] 丁水汀, 丁硕, 孙爽, 但敏, 赵自庆. 复合翼 eVTOL 电池需求及对动力总成安全性的影响 [J]. 推进技术, 2024, 45 (03): 212-226.
[5] 石峰, 董博宇. 某型 eVTOL 无人机总体与气动设计 [J]. 新能源航空, 2024, 2 (01): 1-10.
[6] 李凯, 丁晓宇, 吴沂宁. eVTOL 航空器研制现状及发展趋势 [J]. 民航管理, 2023, (12): 40-44.