

华南理工大学硕士学位论文

LaTeX 模板使用说明

作者姓名

指导教师：xxx 教授

华南理工大学

2025 年 1 月 6 日

目 录

插图目录	II
表格目录	III
第一章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 涵道风扇无人机	2
1.2.2 飞行控制技术	5
1.2.3 轨迹规划技术	7
1.3 本文的主要内容及章节安排	9
参考文献	11

插图目录

图 1-1	猎户座固定翼无人机	2
图 1-2	极飞 P150PRO 农业无人机	2
图 1-3	Cypher	3
图 1-4	Cypher II	3
图 1-5	GoldenEye	4
图 1-6	T-Hawk	4
图 1-7	AirMule	4
图 1-8	Airmule 内部结构	4
图 1-9	Fleye	5
图 1-10	FanTail	5
图 1-11	Odin	5
图 1-12	飞碟	5
图 1-13	都市精灵	5
图 1-14	CDF-390	5

表格目录

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

2010 年，我国正式提出“低空经济”这一概念。2024 年也被称为低空经济元年，全国两会首次将“低空经济”写入政府工作报告中。无人机（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）作为低空经济这一战略新兴产业的重要形态之一，近些年来发展得如火如荼，已经在军事、民用、科研等领域得到了广泛应用。顾名思义，无人机是一种不需要飞行员在飞机上驾驶的飞行器，它的飞行控制可以由飞行员在地面的控制站上进行操纵，也可以基于事先设计好的轨迹完全自主飞行，或者借助如人工智能（Artificial Intelligence, AI）等先进技术在复杂环境中实时地规划轨迹来避障飞行^[1]。

无人机最早于第一次世界大战期间被研制出来用于军事对抗。受限于二十世纪初的科学技术条件，当时的无人机并没有在战场上发挥很大的作用，但是人们并没有因此停止对无人机的研究与发展。时至今日，无人机在俄乌战争中被大规模使用，主要用来执行目标搜寻、侦察、打击和救援等任务，深刻地影响了战场局势。在 2022 年的最后一个晚上，乌克兰的四旋翼无人机向俄罗斯士兵投下了小型炸弹，其凭借着机载的热成像系统实现了在漆黑的夜晚对俄罗斯士兵进行准确打击^[2]。无独有偶，由俄罗斯 Kronshtadt 公司开发的“猎户座（Orion）”固定翼无人机（见图 1-1）也已成功用于攻击乌克兰阵地。该无人机前部安装了一个可以转动的炮塔系统，内部装有红外传感器和激光雷达等设备，用于引导高精武器准确打击目标。除军事用途外，无人机也在民用领域大展身手。例如，无人机结合人工智能以及机器学习（Machine Learning, ML）方法，通过提升效率、环境可持续性和数据驱动的决策指定，为精准农业带来了重大革新^[3]。2022 年，意大利 Cristiano Fragassa 教授团队利用无人机从不同的飞行高度拍摄杂草丛生的田地的图像，开发和测试了一种机器学习方法用来识别植被斑块。该方法可以精确地识别出整个大规模耕作田中的农作物和杂草，该信息可以用来帮助减少水、肥料和除草剂的使用^[4]。在国内，以大疆创新和极飞科技等为代表的科技公司都有自研的农业无人机产品。以极飞 P150PRO 2025 款农业无人机为例（见图 1-2），该无人机集农药喷洒、种子播撒、货物运输和航拍测绘多种功能为一体，每分钟最大喷洒流量可达 32 升，单次航测面积最大可达 300 亩。科研院校中如中国农业大学、华南农业大学^[5]等也都在农业无人机方面取得研究进展。

无人机发展百年，种类繁多，不同的任务需求驱动着创造不同类型的无人机。



图 1-1 猎户座固定翼无人机



图 1-2 极飞 P150PRO 农业无人机

因此按照无人机的任务能力，可将其分为水平起飞着陆（Horizontal Take-off Landing, HTOL）、垂直起飞着陆（Vertical Take-off Landing, VTOL）、混合模型（倾转翼、倾转旋翼和涵道风扇）、直升机和非常规类型^[6]。其中，涵道风扇无人机（Ducted Fan UAV, DFUAV）是指其螺旋桨被封闭在涵道内部的无人机，这些螺旋桨也被称为“风扇”，同时风扇滑流中安装有若干控制舵面进行控制。DFUAV 既有旋翼无人机般的垂直起降能力，又可以像固定翼无人机那样高速巡航，而且这种特殊的配置结构具有空气动力效率高和操作安全性的优势^[7-10]。但不如人意的是，与开放旋翼相比，涵道风扇的罩状旋翼在飞行器周围的流场中会表现出强烈的耦合效应^[11]，并且由于其特殊的气动布局，DFUAV 在垂直起降和水平巡航这两种不同的飞行模式下气动特性也完全不同^[7]，这都对 DFUAV 的控制器设计提出了挑战。此外，针对 DFUAV 的轨迹规划的研究相对匮乏，这种研究的不足在一定程度上限制了 DFUAV 在复杂环境中的高效运作，不利于 DFUAV 的进一步推广应用。

正因如此，设计出适用于 DFUAV 的控制策略以及合理的轨迹规划方法，对于 DFUAV 的进一步发展具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 涵道风扇无人机

目前已知的关于涵道风扇无人机的起源最早可以追溯到二十世纪三十年代，由意大利的 Stipa 和德国的 Kort 率先在该领域开展研究^[11]。在二十世纪五十年代，美国宇航局在研究 Doak VZ-4 和 Bell X-22 涵道风扇垂直起降飞行器时投入了大量精力后取得一些进展，然而他们也发现了一些意料之外的特性，如从悬停到前飞过渡时，会出现机头上仰的趋势^[12]。Pereira 等人^[13]已经对涵道风扇早期的研究进行了详尽的回顾。近年来，

随着先进的控制方法的提出和涵道风扇理论的进一步完善，涵道风扇无人机这一领域不仅引起了众多科研机构的广泛关注，还催生出了一系列具有里程碑意义的创新产品。

在二十世纪八十年代末期，美国 Sikorsky 航空公司试飞了一种名为“Cypher”的小型无人机。该无人机涵道直径 1.75m，重量为 20kg，采用共轴双桨结构提供动力，环形护罩在提升了拉力效率的同时也提升了其安全性。1992 年 4 月，在初代 Cypher 的基础上，Cypher II 进行了首次飞行。相比初代 Cypher，Cypher II 涵道直径 1.9m，重量为 110kg，并且在环形护罩外扩展了固定翼结构，并且尾部还有一个推进式螺旋桨，有效提升了 Cypher II 的飞行速度以及续航时间^[14]，最高时速可达 230km/h，航程超过 185km。



图 1-3 Cypher



图 1-4 Cypher II

2003 年，美国极光飞行科技公司根据国防高级研究计划局的“秘密无人机”计划开发了 GoldenEye-100 无人机，可垂直起降并且能携带 11kg 的有效载荷。次年 7 月，由 GoldenEye-100 衍生出的更小的 GoldenEye-50 无人机首飞。GoldenEye-50 长 70cm，翼展 1.4m，最大飞行速度可达 280km/h^[15]，并且在 2005 年 4 月进行了第一次自主水平飞行转换。GoldenEye-80 是 GoldenEye 系列的第三个版本，长 165cm，重达 68kg，携带有高分辨率摄像机和激光测距仪等传感设备，设计意图用于满足美国陆军未来作战系统计划的要求。

2003 年，Honeywell 航空航天公司为美国陆军开发制造了 RQ-16 T-Hawk 微型无人机，并于 2007 年部署在了伊拉克战场上^[16]。该款无人机采用涵道风扇设计，涵道直径为 35.5cm，总机重量为 7.7kg，巡航速度可达 74km/h，在战场上被广泛应用于可疑目标检查和跟随等任务。在 2011 年日本地震引发海啸进而导致核泄露后，4 架 T-Hawk 被部署在福岛 1 号核电站，其机载的高分辨率摄像头拍摄了核电站受损部分的图像用于帮助日本核工程专家快速定位和解决问题。但是后来有两架 T-Hawk 在核反应堆上空坠毁，Honeywell 公司并没有给出具体原因。



图 1-5 GoldenEye



图 1-6 T-Hawk

2015 年 12 月 30 日，由以色列 Tactical Robotics 公司研发的 AirMule 救护无人机首航。如图1-8所示，AirMule 的起飞旋翼设置在了机身内部，由涵道壁包裹，尾部还有两个推进涵道风扇用于控制姿态。这种构型专为直升机不方便起降的情形而设计，如山川、林地等地形复杂的区域。由于 AirMule 可负载 80kg 的载重能力和 150km/h 的最大速度^[17]，未来还将用于运输货物等任务。



图 1-7 AirMule

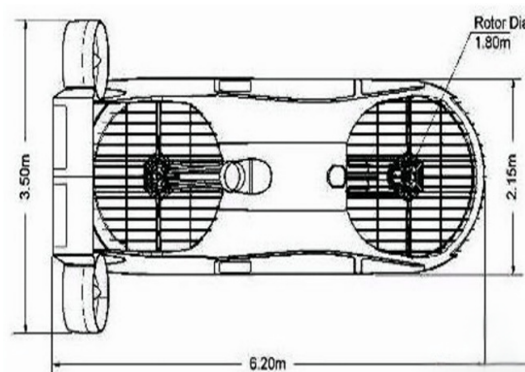


图 1-8 Airmule 内部结构

在 2016 年的 HWTrek 全球智能硬件创新与制造大会上，来自比利时无人机 Fleye 引发众人关注，如图所示。因其大小与篮球相当，许多媒体也把它称为“球形无人机”。Fleye 也属于 DFUAV 的一种，摄像头安装在上部，下部为光流传感器，由于其安全小巧的特点，媒体预测其未来将会应用于室内摄影、娱乐等场合。除上述提到的采用涵道构型无人机外，还有由新加坡 ST Aerospace 研发的 FanTail 系列^[18]、Aesir 公司的 Odin^[19]和美国联合宇航公司的 iSTAR^[20-21]等。

相较于国外的研究成果，我国 DFUAV 研究起步相对较晚，大多处于实验探索阶段。2008 年，哈尔滨盛世特种飞行器有限公司与中国航天科工集团第四研究院和哈尔滨工业大学航天学院合作共同研发制造出国内首例单桨环道“飞碟”，直径 1.2m，续航 40 分



图 1-9 Fleye



图 1-10 FanTail



图 1-11 Odin

钟，最大速度可达 80km/h，并获得国家发明专利。由南昌航空大学设计的“都市精灵”涵道无人机获得 2011 年“中航工业杯—国际无人飞行器创新大奖赛”创意奖，其涵道直径 1.2m，续航时间 1h，最大飞行速度为 50km/h。深圳千叶智能科技公司以研发涵道式无人机设计平台为主，目前已推出 CDF-270、CDF-390 和 EDF-254 等型号的无人机，可用于航拍、巡航和侦察等领域。



图 1-12 飞碟



图 1-13 都市精灵

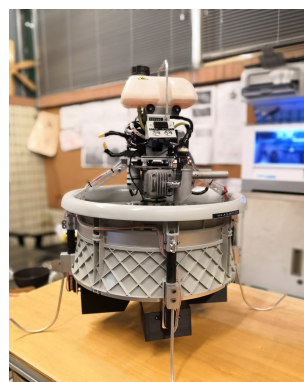


图 1-14 CDF-390

此外，清华大学^[22-23]、北京理工大学^[24]、南京航空航天大学^[25]和华南理工大学^[26-27]等高校也对 DFUAV 展开了不同程度的研究，极大推动了我国在该领域的发展进程。

1.2.2 飞行控制技术

无人机的飞行控制技术是其研究过程中的关键环节，其好坏直接影响了无人机的飞行性能和稳定性。在 DFUAV 发展的早期，由于对涵道风扇的独特气动特性认识不足以及控制理论体系的相对不成熟，DFUAV 的控制器设计主要基于线性控制方法，如 PID 控制器、LQR 控制器和 H_∞ 控制等。

上文提到的 iSTAR 微型 DFUAV 在 2000 年 11 月首次自由飞行时采用的就是 PID 姿

态控制策略^[21]。为了实现位置控制，文献[28]将整个控制系统分为外部和内部两个独立的子系统，采用串级 PID 方法进行控制，并且还实现了用于整个系统的 LQ 补偿器。Pflimlin 等人早期在 DFUAV 的控制方面进行了深入研究^[29-30]，通过对悬停飞行条件线性化，简化飞行动力学，采用 PID 控制方法取得了较好的姿态跟随效果。2005 年，他们推广了线性串级 PID 控制方法，提出了一种自适应反步控制策略着重于解决 DFUAV 在持续恒风条件下的稳定性问题，最后进行了仿真实验^[31]。文献[32]将 LQR 控制器与经典控制器相结合，通过时间响应和奇异值分析来评估控制系统的性能，实际飞行数据验证了该方法的有效性。文献[33]同样将 LQR 控制方法应用于 DFUAV，该控制器具有级联结构，UAV 的角速度由板载陀螺仪测量得到，位置、速度和姿态由外部的动作捕捉系统提供，最终通过实践证明了其可靠性。在 H_∞ 控制器的应用相关文献中，文献[34]针对 DFUAV 易受干扰的特性设计了基于 H_∞ 理论的鲁棒控制器，通过仿真和实际飞行实验证明了该算法相比传统 PID 控制抗干扰性更强。文献[35]采用基于 H_∞ 合成的结构化多环反馈姿态控制器，并使用非光滑优化方法直接调节控制器参数到最优，确保了满意的实际控制效果。

虽然线性控制器易于实现，并且计算资源耗费较少，但是其性能往往受到系统的固有特性的限制，仅能够达到相对保守的性能^[10]。当 DFUAV 由悬停转向高速飞行中应用线性控制器时^[36]，控制性能会下降。作为替代，基于模型的非线性控制方法被广泛使用。如模型预测控制（MPC）、自适应控制和自抗扰控制（ADRC）等。

学者 Tayyab Manzoor 等人在 DFUAV 的 MPC 控制器设计上做了大量研究。在前期的工作中，他提出了一种无偏移的 MPC 框架来应对 DFUAV 的轨迹跟踪问题^[37]，控制策略分为内环和外环，两者都通过无偏移的 MPC 和卡尔曼滤波（KF）的组合来稳定跟踪。后来，为了飞行过程的鲁棒性能，又提出了一种将 MPC 与非线性干扰观测器结合的复合飞行控制技术^[38-39]，并保证了闭环系统的稳定性。近年来，Tayyab Manzoor 将 ML 与 MPC 相结合，提出基于复合学习的 DFUAV 的 MPC 方法^[40-41]。该方法通过离线获取 DFUAV 的名义模型，在线使用强化学习优化控制策略，然后通过 MPC 进行优化和更新，提高计算效率，最后通过仿真证明了可行性。文献[42]采用基于解耦的强自适应姿态控制方案，非线性的 DFUAV 在修整点进行了线性化，提升了系统的稳定裕度，仿真和实际飞行实验都表明姿态跟踪误差有效减少。文献[43]提出了一种基于控制增强的模型参考自适应控制架构，通过在线性时不变控制输入的基础上叠加自适应控制输入，以实时补偿不确定性，确保准确跟踪参考系统。实验表明该方法相比基线控制，速

度跟踪误差减小了约 38%。文献[44]介绍了该实验室设计的可变结构的垂直起降飞行器，基于动态模型进行解耦设计，并设计了一种离散的 ADRC 方法来控制其垂直起降过程。文献[26]使用 ADRC 控制器控制共轴双桨涵道无人机的姿态，使用固定于涵道壁的电磁铁来抓取物品，控制器用于抵消抓取过程中由于重量改变而引起的干扰，最终通过实际飞行实验表明无人机在抓取多个物品后依然能稳定姿态。

基于模型的非线性控制方法需要对系统模型有较为清楚的认识。除了基于模型的控制方法外，还可以采用基于传感器的方法：增量式非线性动态逆（Incremental Nonlinear Dynamic Inversion, INDI）。INDI 作为一种重新配置的非线性动态逆（Nonlinear Dynamic Inversion, NDI）方法^[45-46]，相比于 NDI，对机载模型的依赖较小，并且只需要控制导数。在不确定的干扰情况下，气动变化会导致力与力矩的变化，而这些变化可以使用机载传感器测量得到，通过增量控制帮助系统快速稳定。Smeur 等人对 INDI 控制技术进行了深入研究^[47-49]，并成功在四旋翼无人机上进行应用。在文献[47]中，仅知道非常粗略的飞行器模型的情况下，使用自适应 INDI 控制器在线估计控制效果，最终在姿态控制方面表现出优异的抗干扰和自适应特性。文献[48]中，该团队介绍了微型飞行器姿态控制的 INDI 和位置控制的 INDI 的串级结构，使用四旋翼进出 10m/s 的风洞，相比与 PID 控制情况下，位置误差显著减小。其他的应用包括垂直起降 UAV 的飞行过渡控制^[50]，轨迹跟踪控制^[51]等。

此外，DFUAV 的控制舵面通常装配冗余，控制输入的数量超过了系统自由度的数量，这导致了 UAV 的控制分配问题^[52]。为了达到期望的控制效果，目前广泛采用的控制分配方法是伪逆法^[31,53-54]，直接计算从控制舵面角度映射到控制力矩的非方阵的伪逆矩阵。然而，由于实际的舵面角度受到约束，在伪逆操作下无法得到整个可达到的力矩的集合^[55]，导致在飞行包络线附近损失了舵面的部分控制能力^[56]。

1.2.3 轨迹规划技术

当飞行控制技术发展到一定阶段后，为满足更加多样化、个性化的飞行任务需求，以及应对充满不确定性、受各种约束情况下的飞行环境，对 UAV 的轨迹规划技术的研究也必不可少。一般情况下，轨迹规划过程分为两个部分：路径规划和轨迹优化。路径规划是指在给定的环境中，希望能够找到一条飞行路线，这条路线满足不与障碍物碰撞或者尽可能远离障碍物，并且满足路线最短等要求。而轨迹优化是对找到的飞行路线进行平滑处理并且赋予时间、速度等信息并且需要满足 UAV 的动力学约束。

在路径规划方面，目前广泛采用的方法主要有三类：

- (1) 基于栅格图的方法，该方法将待规划的环境划分为若干栅格，为栅格添加特殊标记以表示起点、终点、障碍物等信息。然后通过搜索算法如 A* 算法、D* 算法、LPA* 算法等在栅格中寻找一条最优路径。1968 年，Hart 等人提出了 A* 算法^[57]，该算法通过引入与目标点有关的启发式信息，引导算法沿着最优路径前进。近年来，在 A* 算法的基础上出现了很多改进版本并成功应用于 UAV 的路径规划。文献^[58]通过设置最小步长、最大倾斜角以及引入惩罚函数等方式来改造 A* 算法中的代价函数以适应 UAV 的飞行特性。实验结果表明改进后的算法相比改进之前减少了 34.1% 的转弯角度，使得 UAV 飞行过程更加平稳，但是算法的扩展节点有所增加，耗时更久。D* 算法由 A* 算法发展而来，D 即 Dynamic，相比于 A* 算法增加了动态避障搜索环节，主要用于机器人的自主寻路。Kadry 等人通过在机器人移动过程中使用旋转矩阵的方式来改变机器人朝向，可以在某些情况下沿着弧线移动，进而能够更快的执行任务^[59]。
- (2) 基于拓扑图的方法将环境表示为一个图，图中的节点代表环境中的位置，边则表示节点之间的连接关系。常用 Dijkstra^[60]算法和 Floyd 算法^[61]求解两点间最短路径。Dijkstra 基于贪心策略，确保每次处理的节点都是距离起点最近的点，并且会判断更新到相邻节点的最短路径。文献^[62]在传统 Dijkstra 算法的基础上结合广度优先搜索、堆栈和队列数据结构提出了一种反向标记 Dijkstra 算法，通过理论分析得出该方法具有较低的时间复杂度，并且收敛速度优于常规算法。Floyd 算法是在求解过程中将每个点轮流作为起点，重复执行多次 Dijkstra 算法，适合计算所有节点对之间的最短距离。由于包含了三重循环，所以时间复杂度较高，尤其是在处理稀疏图的情况下。
- (3) 基于采样的方法包括概率路线图 (PRM)^[63]、快速扩展随机树 (RRT)^[64]以及一系列改进版本。无论是基于栅格图还是拓扑图的搜索都有一个前提就是需要对环境有较为清晰的认识，但当环境空间复杂或者维度高时，时间复杂度通常以指数增长，而基于采样的方法能够有效避免这一问题。PRM 算法分为两步，首先在自由空间中生成多个点构成无碰撞的无向图，然后采用图搜索方法如 Dijkstra 来搜索从起点到终点的最优路径。但搜索的路径往往并非最优，所以有学者通过优化点的生成，去除冗余采样点和优化碰撞检测等方式改进路径质量^[65]。RRT 算法通过构建一颗以起点为根节点的随机树，逐步扩展，直到搜索到目标，因此 RRT 是一种增量式的搜索算法。但 RRT 同样有路径非最优的问

题，因此有学者又提出了 RRT* 算法，通过在生成新节点后有条件地重构树节点，使得路径更加接近最优，但也因此耗费了时间。文献[66]介绍了一种改进的 RRT* 算法，通过采用三角不等式重布线的方式来寻找 UAV 在三维环境下的无碰撞路径，仿真结果表明在时间和距离上相比 RRT* 更优。

路径规划得到的飞行路线已满足无碰撞且尽可能距离最优，但往往不够平滑，不满足 UAV 的动力学约束。因此需要进行轨迹优化使路径平滑且满足动力学约束。最常用的轨迹优化方法是基于参数曲线的方法，如多项式曲线、贝塞尔曲线、B 样条曲线、三次样条曲线等。基于参数曲线的方法优化的路径不仅仅是位置的平滑，更多的还包括速度、加速度乃至加加速度的连续，这一点对 UAV 的飞行至关重要。基于多项式曲线的轨迹优化是指参数 y （如路径长度、速度）是参数 x （如时间、曲率）的 n 次多项式。通过边界条件如起点、途径点和终点的位置以及速度、加速度等信息来确定多项式系数，从而得到平滑轨迹。文献[67]中，在使用 RRT* 得到四旋翼的初步路径后，用多项式曲线表示了实际轨迹。1962 年，法国工程师 Bézier 发现了一种用很少控制点就能得到复杂平滑曲线的方法，即贝塞尔曲线。但是在目前的实际应用中，用的最广泛的轨迹优化方法还是 B 样条曲线，B 样条曲线由贝塞尔曲线发展而来，不仅保留了贝塞尔曲线的优点，还具备局部控制性质。文献[68-70]都使用 B 样条曲线来表示最终轨迹。为了避免高阶多项式拟合过程中的龙格现象，使用多段样条曲线对型值点插值也是常用方法。可以通过相邻节点函数值相等、导数相等以及边界等条件来确定样条曲线的系数。文献[71]给出了一种基于三维三次样条曲线的完整轨迹方案。除基于参数曲线的轨迹优化方法外，还有二次规划方法[67]、粒子群算法[72]、人工势场法[73]等。

综上所述，轨迹规划方法种类繁多，每种方法都有自己的特点和适用场景，尽管有些方法一开始并非针对 UAV 的规划而提出，但在具体实践过程中依然可以根据彼此的特点和需求来选择合适的规划方法。

1.3 本文的主要内容及章节安排

本文针对 DFUAV 进行控制器设计以及轨迹规划设计，掌握被控对象的模型是基础，所以不可避免地需要首先对 DFUAV 进行数学建模分析。在此基础上，考虑到 MPC 控制器需要较高算力，ADRC 控制器对参数较为敏感以及无法足够详尽的了解 DFUAV 的模型知识等情况，本文采用基于传感器的非线性控制方法：INDI 控制。在优化控制分配问题方面，将参考文献[56]采用优先级控制分配（PCA）方案。最终实现基于

INDI+PCA 的 DFUAV 的姿态控制方案设计。然后，将 INDI 的理论思想扩展到速度环，实现速度、位置跟踪控制。在轨迹规划设计方面，考虑到 DFUAV 未来面临复杂多变的应用场景，因此本文采用基于采样的路径规划方法，结合 RRT* 算法和 RRT-Connect 算法各自的优势，提出 C-RRT* 算法。然后通过 B 样条曲线对路径进行平滑优化，最终实现 DFUAV 的自主飞行。

根据以上主要内容，本文的章节安排如下：

第一章：绪论。首先介绍了 DFUAV 的研究背景和意义，然后对 DFUAV 的国内外发展现状进行了概述，并且论述了 DFUAV 的飞行控制技术和轨迹规划技术的理论及应用。最后介绍了本文的主要内容及章节安排。

第二章：涵道风扇式无人机的系统建模与硬件设计。首先定义了 DFUAV 的坐标系和姿态表示方法，然后采用牛顿-欧拉方法推导出 DFUAV 的刚体运动学模型和刚体动力学模型，并分析了作用在涵道上的力与力矩。

第三章：涵道风扇式无人机的姿态控制。首先介绍了 INDI 控制器的基本原理，然后根据原理将 INDI 方法应用于姿态环。在底层的控制分配环节，采用 PCA 控制分配方法优先满足期望力矩。最后进行仿真和飞行实验，分析验证姿态控制器的性能。

第四章：涵道风扇式无人机的速度控制。根据 INDI 的理论思想将该方法扩展到速度环，实现速度、位置跟踪控制。最后进行仿真和飞行实验，分析验证速度控制器的性能。

第五章：涵道风扇式无人机的轨迹规划设计。首先介绍了 RRT* 算法和 RRT-Connect 算法的基本原理，结合两者的优势提出了 C-RRT* 算法。然后介绍 B 样条曲线的基本原理及性质，通过 B 样条曲线对 C-RRT* 算法搜索得到的路径进行平滑优化，最后进行实验验证。

第六章：总结与展望。首先对全文进行系统性地总结，分析了本文的创新点和不足之处，并对 DFUAV 未来的研究方向进行了展望。

参考文献

- [1] Rezwan S, Choi W. Artificial Intelligence Approaches for UAV Navigation: Recent Advances and Future Challenges[J]. IEEE Access, 2022, 10: 26320-26339.
- [2] Kunertova D. The War in Ukraine Shows the Game-Changing Effect of Drones Depends on the Game[J]. Bulletin of the Atomic Scientists, 2023, 79(2): 95-102.
- [3] Agrawal J, Arafat M Y. Transforming Farming: A Review of AI-Powered UAV Technologies in Precision Agriculture.[J]. Drones (2504-446X), 2024, 8(11).
- [4] Fragassa C, Vitali G, Emmi L, et al. A New Procedure for Combining UAV-Based Imagery and Machine Learning in Precision Agriculture[J]. Sustainability, 2023, 15(2): 998.
- [5] Liu Z, Wen S, Huang G, et al. Agricultural UAV Obstacle Avoidance System Based on a Depth Image Inverse Projection Algorithm and B-Spline Curve Trajectory Optimization Algorithm[J]. Information Technology and Control, 2024, 53(3): 736-757.
- [6] Hassanalian M, Abdelkefi A. Classifications, Applications, and Design Challenges of Drones: A Review[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2017, 91: 99-131.
- [7] Johnson E N, Turbe M A. Modeling, Control, and Flight Testing of a Small-Ducted Fan Aircraft[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29(4): 769-779.
- [8] Zhang T, Barakos G N. Review on Ducted Fans for Compound Rotorcraft[J]. The Aeronautical Journal, 2020, 124(1277): 941-974.
- [9] Qian Y, Luo Y, Hu X, et al. Improving the Performance of Ducted Fans for VTOL Applications: A Review[J]. Science China Technological Sciences, 2022, 65(11): 2521-2541.
- [10] Manzoor T, Xia Y q, Ali Y, et al. Flight control techniques and classification of ducted fan aerial vehicles[J]. Control Theory Appl, 2022, 39(2): 201-221.
- [11] III O J O, Gelhausen P A, Inman D J. Nondimensional Modeling of Ducted-Fan Aerodynamics[J]. Journal of Aircraft, 2012.
- [12] Cook W L. Summary of Lift and Lift/Cruise Fan Powered Lift Concept Technology[R]. A-93113. 1993.
- [13] Pereira J L. Hover and Wind-Tunnel Testing of Shrouded Rotors for Improved Micro Air Vehicle Design[M]. University of Maryland, College Park, 2008.
- [14] Murphy D, Bott J, Cycon J, et al. Air Mobile Ground Surveillance and Security System

- (AMGSSS) Project Summary Report[J]. Technical Document, 1996, 2914.
- [15] Schaefer C, Baskett L. GoldenEye: The Clandestine UAV[G]//2nd AIAA "Unmanned Unlimited" Conf. and Workshop & Exhibit. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
 - [16] White A. Upgrades for gMAV in light of Iraq ops[J]. UVNews. April, 2010, 22.
 - [17] Yu S, Heo J, Jeong S, et al. Technical Analysis of VTOL UAV[J]. Journal of Computer and Communications, 2016, 4(15): 92-97.
 - [18] Mateo Sanguino T d J, Lozano Domínguez J M. Design and Stabilization of a Coandă Effect-Based UAV: Comparative Study between Fuzzy Logic and PID Control Approaches[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2024, 175: 104662.
 - [19] Crivoi O, Doroftei I, Adascalitei F. A survey of unmanned aerial vehicles based on Coanda effect[J]. Thenomus Ji, 2013, 20.
 - [20] Fleming J, Jones T, Ng W, et al. Improving Control System Effectiveness for Ducted Fan VTOL UAVs Operating in Crosswinds[G]//2nd AIAA "Unmanned Unlimited" Conf. and Workshop & Exhibit. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
 - [21] Lipera L, Colbourne J D, Tischler M B, et al. The micro craft iSTAR micro air vehicle: Control system design and testing[C]//Annual Forum Proceedings-American Helicopter Society: vol. 57: 2. 2001: 1998-2008.
 - [22] Chou T, Ying Q, Qian Y, et al. Study on Overall Design of a Vertical Take-Off and Landing Unmanned Aerial Vehicle Powered by Electric Ducted Fans[C]//. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2021.
 - [23] Luo Y, Ai T, He Y, et al. Numerical Analysis of Wind Effects on Aerodynamic Characteristics of a Ducted Fan[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(5): 263-280.
 - [24] Manzoor T, Pei H, Xia Y, et al. Compound Learning-Based Model Predictive Control Approach for Ducted-Fan Aerial Vehicles[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2024: 1-13.
 - [25] Cai H, Zhang Z, Deng S. Numerical Prediction of Unsteady Aerodynamics of a Ducted Fan Unmanned Aerial Vehicle in Hovering[J]. Aerospace, 2022, 9(6): 318.
 - [26] Yin Z, Pei H. A Ducted Fan UAV for Safe Aerial Grabbing and Transfer of Multiple Loads Using Electromagnets[C]//2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelli-

- gent Robots and Systems (IROS). 2024: 10342-10349.
- [27] 程子欢. 涵道风扇动力尾座式垂直起降飞行器飞行模态转换控制研究[D]. 华南理工大学, 2022.
- [28] Eriksson M, Wedell B. Performance Estimation of a Ducted Fan UAV[M]. Institutionen för systemteknik, 2006.
- [29] Pflimlin J M, Binetti P, Trouchet D, et al. Aerodynamic Modeling and Practical Attitude Stabilization of a Ducted Fan Uav[C]//2007 European Control Conference (ECC). Kos, Greece: IEEE, 2007: 4023-4029.
- [30] Pflimlin J, Binetti P, Souères P, et al. Modeling and Attitude Control Analysis of a Ducted-Fan Micro Aerial Vehicle[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(3): 209-218.
- [31] Pflimlin J M, Soueres P, Hamel T. Position Control of a Ducted Fan VTOL UAV in Crosswind[J]. International Journal of Control, 2007, 80(5): 666-683.
- [32] WHITE J, PHELAN J. Stability Augmentation for a Free Flying Ducted Fan[G]// Guidance, Navigation and Control Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [33] Muehlebach M, D' Andrea R. The Flying Platform –A Testbed for Ducted Fan Actuation and Control Design[J]. Mechatronics, 2017, 42: 52-68.
- [34] 李远伟, 王常虹, 伊国兴, 等. 涵道式无人机鲁棒控制系统设计[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(09): 81-87.
- [35] Fan W, Xiang C, Xu B. Modelling, Attitude Controller Design and Flight Experiments of a Novel Micro-Ducted-Fan Aircraft[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(3).
- [36] Saeed A S, Younes A B, Cai C, et al. A Survey of Hybrid Unmanned Aerial Vehicles[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 98: 91-105.
- [37] Manzoor T, Xia Y, Zhai D H, et al. Trajectory Tracking Control of a VTOL Unmanned Aerial Vehicle Using Offset-Free Tracking MPC[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020.
- [38] Manzoor T, Sun Z, Xia Y, et al. MPC Based Compound Flight Control Strategy for a Ducted Fan Aircraft[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 107: 106264.
- [39] Manzoor T, Pei H, Cheng Z. Composite Observer-Based Robust Model Predictive Con-

- trol Technique for Ducted Fan Aerial Vehicles[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2023, 111(4): 3433-3450.
- [40] Manzoor T, Pei H, Sun Z, et al. Model Predictive Control Technique for Ducted Fan Aerial Vehicles Using Physics-Informed Machine Learning[J]. *Drones*, 2023, 7(1): 4.
- [41] Manzoor T, Pei H, Xia Y, et al. Compound Learning-Based Model Predictive Control Approach for Ducted-Fan Aerial Vehicles[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2024: 1-13.
- [42] Zhao H, Sheng S Z, Li J B, et al. Modelling and Attitude Control of a Miniature Ducted Fan UAV[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2015.
- [43] Ai T, Luo Y, Zeng D, et al. Robust Adaptive Control of a Coaxial-Ducted-Fan Aircraft with Uncertainty Model[J]. *Electronics*, 2025, 14(1): 170.
- [44] Wen J, Chen S, Yang A, et al. Research on Vertical Take-off and Landing Control of New VTOL Aircraft Based on ADRC[C]//2021 36th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC). 2021: 1-6.
- [45] Bacon B, Ostroff A, Joshi S. Reconfigurable NDI Controller Using Inertial Sensor Failure Detection & Isolation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(4): 1373-1383.
- [46] Design and Flight Testing of Incremental Nonlinear Dynamic Inversion-based Control Laws for a Passenger Aircraft[EB]. AIAA SciTech Forum.
- [47] Smeur E J J, Chu Q, Croon G C H E de. Adaptive Incremental Nonlinear Dynamic Inversion for Attitude Control of Micro Air Vehicles[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2015.
- [48] Smeur E J J, de Croon G C H E, Chu Q. Cascaded Incremental Nonlinear Dynamic Inversion for MAV Disturbance Rejection[J]. *Control Engineering Practice*, 2018, 73: 79-90.
- [49] Steffensen R, Steinert A, Smeur E J J. Nonlinear Dynamic Inversion with Actuator Dynamics: An Incremental Control Perspective[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2023, 46(4): 709-717.
- [50] Cheng Z, Pei H. A Corridor-Based Flight Mode Transition Strategy for Agile Ducted-Fan Tail-Sitter UAV: Altitude-hold Transition[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023,

- 36(9): 330-345.
- [51] Taherinezhad M, Ramirez-Serrano A. An Enhanced Incremental Nonlinear Dynamic Inversion Control Strategy for Advanced Unmanned Aircraft Systems[J]. *Aerospace*, 2023, 10(10): 843.
 - [52] Naldi R, Marconi L. A Prototype of Ducted-Fan Aerial Robot with Redundant Control Surfaces[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2014, 76(1): 137-150.
 - [53] Peddle I K, Jones T, Treurnicht J. Practical near Hover Flight Control of a Ducted Fan (SLADe)[J]. *Control Engineering Practice*, 2009, 17(1): 48-58.
 - [54] Sheng S, Sun C. A Near-Hover Adaptive Attitude Control Strategy of a Ducted Fan Micro Aerial Vehicle with Actuator Dynamics[J]. *Applied Sciences*, 2015, 5(4): 666-681.
 - [55] Durham W, Bordignon K A, Beck R. Aircraft Control Allocation[M]. John Wiley & Sons, 2017. 308 pp.
 - [56] 蒙超恒, 裴海龙, 程子欢. 涵道风扇式无人机的优先级控制分配[J]. *航空学报*, 2020, 41(10): 327-338.
 - [57] Hart P E, Nilsson N J, Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths[J]. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 1968, 4(2): 100-107.
 - [58] Li Y, Dong X, Ding Q, et al. Improved A-STAR Algorithm for Power Line Inspection UAV Path Planning[J]. *Energies*, 2024, 17(21): 5364.
 - [59] Kadry S, Alferov G, Fedorov V, et al. Path Optimization for D-star Algorithm Modification[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2022, 2425(1): 080002.
 - [60] Dijkstra E W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs[G]//Edsger Wybe Dijkstra: His Life, Work, and Legacy: vol. 45. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022: 287-290.
 - [61] Floyd R W. Algorithm 97: shortest path[J]. *Communications of the ACM*, 1962, 5(6): 345-345.
 - [62] Zhu D D, Sun J Q. A New Algorithm Based on Dijkstra for Vehicle Path Planning Considering Intersection Attribute[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 19761-19775.
 - [63] Geraerts R, Overmars M H. A Comparative Study of Probabilistic Roadmap Planners[G]//Boissonnat J D, Burdick J, Goldberg K, et al. *Algorithmic Foundations of Robotics V*.

- Berlin, Heidelberg: Springer, 2004: 43-57.
- [64] LaValle S M, Kuffner J J. Randomized Kinodynamic Planning[J]. The International Journal of Robotics Research, 2001, 20(5): 378-400.
- [65] Li Q, Xu Y, Bu S, et al. Smart Vehicle Path Planning Based on Modified PRM Algorithm [J]. Sensors, 2022, 22(17): 6581.
- [66] Fusic S J, Sitharthan R. Improved RRT* Algorithm-Based Path Planning for Unmanned Aerial Vehicle in a 3D Metropolitan Environment[J]. Unmanned Systems, 2024, 12(05): 859-875.
- [67] Arshad M A, Ahmed J, Bang H. Quadrotor Path Planning and Polynomial Trajectory Generation Using Quadratic Programming for Indoor Environments[J]. Drones, 2023, 7(2): 122.
- [68] Huang G, Ma Q. Research on Path Planning Algorithm of Autonomous Vehicles Based on Improved RRT Algorithm[J]. International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, 2022, 20(1): 170-180.
- [69] Eshtehardian S A, Khodaygan S. A Continuous RRT*-Based Path Planning Method for Non-Holonomic Mobile Robots Using B-spline Curves[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2023, 14(7): 8693-8702.
- [70] Feng H, Hu Q, Zhao Z, et al. Smooth Path Planning under Maximum Curvature Constraints for Autonomous Underwater Vehicles Based on Rapidly-Exploring Random Tree Star with B-spline Curves[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 133: 108583.
- [71] Cote K. Complex 3D Flight Trajectory Generation and Tracking Using Cubic Splines[G] //1st UAV Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [72] Shin J J, Bang H. UAV Path Planning under Dynamic Threats Using an Improved PSO Algorithm[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2020, 2020(1): 8820284.
- [73] Sun Y, Chen W, Lv J. Uav Path Planning Based on Improved Artificial Potential Field Method[C]//2022 International Conference on Computer Network, Electronic and Automation (ICCNEA). 2022: 95-100.