



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

垂直起降固定翼无人机设计

Vertical take-off and landing fixed-wing UAV design

姓 名 张婵媛

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 姚冀涛

职 称 副教授

完成时间 2022年6月3日



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

垂直起降固定翼无人机设计

Vertical take-off and landing fixed-wing UAV design

姓 名 张婵媛

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 姚冀涛

职 称 副教授

完成时间 2022年6月3日

天津中德应用技术大学

本科生毕业设计（论文）选题申报表

学 院	航空航天学院	申 报 人	姓 名	姚冀涛		
专 业	飞行器制造工程		技术职务	正高	副高 √	中级
题目名称	垂直起降固定翼无人机设计					
题目类型	自拟	题目来源	其他项目			
课题来源、 背景及意义	<p>近年来, 针对中国民用情况、环境监测、国土安全监测等任务, 人们对无人机的性能需求越来越高。垂直起降固定翼无人机是近几年的发展趋势, 且垂直起降固定翼无人机结合了多旋翼和固定翼两者的优势, 以其起降不受场地限制又可快速巡飞、续航时间长等优势, 逐渐成为无人机中的新宠, 在多个领域发挥着越来越大的作用。目前垂直起降固定翼无人机正逐步取代多旋翼飞行器的主导地位。</p> <p>垂直起降技术从诞生到现在经历了数十年的发展, 从最初的用于军事领域到现在不断的向民用领域转化, 尤其是在小型无人机方面, 垂直起降技术可以运用在日常高速、电力、森林等巡检工作, 同时还在物流运输, 抢险救援、医疗救助方面也为人们提供更多的便捷。垂直起降固定翼无人机无需跑道, 即使是在行驶中的车顶上都可随时起降, 可以保证在山区、丘陵、丛林等复杂地形和建筑物密集区域顺利作业。而在军用方面也运用广泛, 垂直起降固定翼无人机也可实现察打一体和舰载作战。在军舰上起降, 对于提高海军的海上监视和侦察能力具有独特优势, 可以保证舰载作战的快速反应和及时性, 防止敌舰逃逸, 更好地维护国家的权益。</p>					

任务及要求	<p>设计一款既拥有旋翼机稳定垂直起降功能,又兼具固定翼长航时、远航程优势的小型无人机。采用目前较为成熟的多旋翼和固定翼结合的形式,合理设计布局形式。利用 SolidWorks 软件构建模型,并对其进行力学与运动学分析。查阅文献归纳总结并分析各自的特性和技术瓶颈,从而为进一步的研究设计和性能分析提供依据。</p> <p>(1) 分析固定翼与旋翼无人机特征,并对垂直起降固定翼结构分析研究,从而完成垂直起降固定翼无人机的整体结构设计。</p> <p>(2) 对各部件建立 Solidworks 三维实体模型,完成部件内部连接部分的构建,并进行整体装配,对模型进行优化。</p> <p>(3) 对垂直起降固定翼无人机机构进行运动学和力学仿真分析,验证该机构的可行性,得到机构的运动学和力学特性。</p>
工作条件	实验室能够提供毕设所需软、硬件,能够满足毕业设计要求。
知识与能力要求	<p>知识要求:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 具备较好的结构学相关知识基础; 2. 具备静力学相关知识; 3. 掌握相关分析计算方法; 4. 有相关绘图知识基础; 5. 具备空气动力学基础知识。 <p>能力要求:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 熟练运用 SolidWorks 绘图软件; 2. 具有一定的数学基础可以进行简单计算; 3. 对有限元分析有一定的了解,积极气动分析相关知识。
<p>系(教研室)审查意见:</p> <p style="text-align: right;">负责人(签名): 年 月 日</p>	



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

毕业设计（论文）任务书

题 目： 垂直起降固定翼无人机设计

学 院： 航空航天学院

专 业： 飞行器制造工程

学生姓名： 张婵媛

学 号： 18414020130

起止日期： 2021年12月3日~2022年6月3日

指导教师： 姚冀涛

任务书下达日期：2021年12月3日

任务书填写要求

1. 毕业设计（论文）任务书由指导教师根据各课题的具体情况填写，经专业负责人审查签字后生效。此任务书应在毕业设计（论文）开始前一周内填好并发给学生；
2. 任务书内填写的内容，必须和学生毕业设计（论文）完成的情况相一致；
3. 任务书内有关“学院”、“专业”等名称的填写，应写中文全称，不能写数字代码。学生的“学号”要写全号（如：16014010101）；
4. 有关年月日等日期的填写，应当按照国标 GB/T 7408—94《数据元和交换格式、信息交换、日期和时间表示法》规定的要求，一律用阿拉伯数字书写。如“2004 年 3 月 21 日”或“2004-03-21”。
5. 本毕业设计（论文）课题成果的要求，内容要具体化和数量化。如“毕业设计（论文）一套；A0 号装配图纸 1 张；A2 号电气控制原理图纸 2 张；实物样机 1 台；产品 2 件”等。

毕 业 设 计（论 文）任 务 书

1. 毕业设计（论文）课题背景及意义

近年来,针对中国民用情况、环境监测、国土安全监测等任务,人们对无人机的性能需求越来越高。垂直起降固定翼无人机是近几年的发展趋势,且垂直起降固定翼无人机结合了多旋翼和固定翼两者的优势,以其起降不受场地限制又可快速巡飞、续航时间长等优势,逐渐成为无人机中的新宠,在多个领域发挥着越来越大的作用。目前垂直起降固定翼无人机正逐步取代多旋翼飞行器的主导地位。

垂直起降技术从诞生到现在经历了数十年的发展,从最初的用于军事领域到现在不断的向民用领域转化,尤其是在小型无人机方面,垂直起降技术可以运用在日常高速、电力、森林等巡检工作,同时还在物流运输,抢险救援、医疗救助方面也为人们提供更多的便捷。垂直起降固定翼无人机无需跑道,即使是在行驶中的车顶上都可随时起降,可以保证在山区、丘陵、丛林等复杂地形和建筑物密集区域顺利作业。而在军用方面也运用广泛,垂直起降固定翼无人机也可实现察打一体和舰载作战。在军舰上起降,对于提高海军的海上监视和侦察能力具有独特优势,可以保证舰载作战的快速反应和及时性,防止敌舰逃逸,更好地维护国家的权益。

垂直起降固定翼无人机因为集合了旋翼与固定翼无人机的优势,既能垂直起降又能高速飞行,是近几年无人机行业炙手可热的机型之一。到目前,行业里大小生产制造固定翼垂直起降无人机已近百家,并且不少无人机企业已将垂直起降固定翼作为主打和核心技术。在近年,无人机驾驶员也被正式确定为新职业,这都意味着垂直起降固定翼无人机在各应用领域存在很大的人才缺口。垂直起降固定翼无人机,未来已成趋势,在未来几年需求将更加强劲。

2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

本课题主旨设计一款既拥有旋翼机稳定垂直起降功能,又兼具固定翼长航时、远航程优势的小型无人机。采用目前较为成熟的多旋翼和固定翼结合的形式,合理设计布局形式。利用 SolidWorks 软件构建模型,并对其进行力学与运动学分析。查阅文献归纳总结并分析各自的特性和技术瓶颈,从而为进一步的研究设计和性能分析提供依据。

课题内容如下:

(1) 分析固定翼与旋翼无人机特征,并对垂直起降固定翼结构分析研究,从而完成垂直起降固定翼无人机的整体结构设计。

(2) 对各部件建立 Solidworks 三维实体模型,完成部件内部连接部分的构建,并进行整体装配,对模型进行优化。

(3) 对垂直起降固定翼无人机机构进行运动学和力学仿真分析,验证该机构的可行性,得到机构的运动学和力学特性。

毕 业 设 计（论 文）任 务 书

3. 毕业设计（论文）课题成果（包括毕业设计论文、图表、实物样品等）：

- (1) 一篇毕业设计论文；
- (2) 三维模型；
- (3) 一张模型装配图。

.....

4. 推荐参考资料：

- [1] 杨梦琳, 李道春, 万志强等. 中国面向遥感应用的垂直起降无人机现状和应用前景分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(04):496-503.
- [2] 张飞. 垂直起降固定翼无人机研究[D]. 南昌航空大学, 2019.
- [3] 杨传广, 马铁林, 甘文彪, 薛子涵, 张秦岭. 垂直起降固定翼无人机技术特点浅析[C]//2017年(第三届)中国航空科学技术大会论文集(下册)., 2017:61-66.
- [4] Goure D. A new kind of carrier air wing. <https://news.usni.org/2012/09/23/new-kind-carrier-air-wing>, 2012.
- [5] 包荣剑. 林用小型垂直起降固定翼无人机的设计研究[D]. 东北林业大学, 2019.
- [6] 王珂, 李晓甜. 垂起固定翼无人机高速公路无人值守巡检系统应用研究[J]. 江苏科技信息, 2021, 38(25):56-58.
- [7] 贺玺睿. 垂直起降固定翼电力巡线无人机飞控系统的设计[D]. 东北农业大学, 2020.
- [8] Jing Zhu, Qun Gu, Li Liu. Requirements for Application of China's Vertical Takeoff and Landing UAV in Maritime Supervision[P]. Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Automatic Control and Information Engineering (ICACIE 2017), 2017.

所在专业审查意见：

负责人：_____

年 月 日



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计（论文）开题报告

题 目： 垂直起降固定翼无人机设计

学 院： 航空航天学院

专 业： 飞行器制造工程

学生姓名： 张婵媛

学 号： 18414020130

起止日期： 2021年12月3日~2022年6月3日

指导教师： 姚冀涛

开题日期： 2022年3月5日

一、 开题报告内容（课题的目的意义、与本课题有关的国内外研究（应用）情况及发展趋势、课题主要研究内容、参考文献等）

（一）选题目的和意义

1、选题意义：

垂直起降固定翼无人机能够以旋翼无人机方式垂直起降，并能以固定翼方式巡航前飞。与传统旋翼无人机相比较，垂直起降固定翼无人机具有前飞速度快、航程远、航时长等显著优势，而与常规固定翼无人机相比较，垂直起降固定翼无人机能够定点起降和悬停，对机场跑道没有依赖，任务能力显著增强，垂直起降无人机尤其适用于甲板起降和无跑道的场合。基于以上特点，垂直起降固定翼无人机可部署在地理环境复杂，任务要求高的场景中，具有广泛的应用前景，进一步提高垂直起降固定翼无人机的性能，设计新型垂直起降固定翼无人机，使其在军事和民用领域里发挥更广泛的作用，将会成为航空器的重要发展方向。

2、选题目的：

垂直起降无人机融合了旋翼无人机对起降场地依赖小和固定翼无人机飞行效率高的优点，在民用上可用于林业防护，林业起飞场地环境差的条件下，而能实现垂直起降功能的小型固定翼无人机可以满足日常林用任务要求，进行林业的防护；海上监管，在海事管理领域使用垂直起降固定翼无人机，无需跑道，能实现远航程并完成在海上作业；高速巡检，针对高速公路自动化巡检管养作业的需求，垂直起降无人机支持远程起降作业，以实现高速公路长距离路段自动化巡检工作；电力巡线，垂直起降固定翼无人机无需跑道，可以完成高难度的电力巡线，给电力巡线带来便利。以及物质运输等。

垂直起降固定翼无人机不仅是应用于民用领域，军用领域也应用此类无人机，垂直起降无人机可用于海战，其可在母舰或岛屿周边执行敌情侦察、战区防御、火力支援、对海攻击、毁伤评估、物资补给、伤员救助、通讯中继等。其应用已深入航拍、测绘、侦察、运输等各个领域。

（二）国内外研究现状及发展趋势

由于多旋翼在航程、速度、飞行时间等方面难以满足越来越严苛的用户需求。自上个世纪，人们就开始不断探索，寻求一种既可以垂直起降又能保障高航速和长航时的整合型技术。近年来，由于技术的进步，垂直起降固定翼无人机成为现实，并逐渐兴起，并从军用开始走向民用。

1、国外研究现状：

2020 年垂直起降无人机加速军事化应用。因不受起降场地限制，能适应航海、山地等复杂地形环境，美国将垂直起降飞行器列为美军十大未来关键装备之首。由美国贝尔公司研制的“鹰眼”倾转旋翼无人机，是早期研发的一款典型的垂直起降固定翼飞机。2020 年，美空军发布“敏捷至上”项目，极力推进电动垂直起降 eVTOL 无人机军事化应用。多家新

兴 eVTOL 商企参与, 目前 Joby 和 Beta 两家已经进入试飞阶段。

SONGBIRD500 系列是由德国 Aerolution 公司研发的复合翼垂直起降无人机, 同样采用复合翼垂直起降方案。SONGBIRD500 在正常天气条件下飞行时间长达一小时, 而现场安装时间仅需不到 10 分钟, 这使其成为一款非常高效、高回报率的无人机; 瑞士 Wingtra 研发的复合型无人机采用复合翼方案, 配有固定翼, 翼前装有螺旋桨, 对起降场地没有过多要求, 即便是房屋之间的狭小地带或者土路也能起降自如。美国 Martin UAV 公司的 V-BAT 无人机采用尾座式垂直起降形式, 形似扫帚底部的涵道风扇使无人机可以直立起降, 升空后转换成水平飞行模式, 向普通飞机一样飞行。这些都极大的扩展了无人机应用范围, 可应用于精准农业、高精度测绘、专业搜索和救援等众多领域。

2、国内研究现状:

2018 年 11 月举办的珠海航展上, 由航天十一院研发的彩虹-10 无人倾转旋翼机, 同样是采用第三代倾转旋翼飞行器技术, 可以实现倾转旋翼垂直起降的无人机, 展示了我国对无人倾转旋翼机的研发能力。

还有旋翼固定翼复合式, 代表型号有纵横股份“CW 大鹏”系列, 彩虹 CH804D 等。成都纵横于 2015 年对外发布 CW-20 大鹏无人机, 采用复合翼形式, 以常规固定翼飞行器为基础, 在起降及低速状态下按照多轴模式飞行; 而在高速状态下, 按照固定翼模式飞行。CW-20 大鹏兼具固定翼无人机航时长、速度高、距离远的特点和旋翼无人机垂直起降的功能, 在其他固定翼难以使用的山区、丘陵、丛林、船舶等复杂地形和建筑物密集的区域, 不需要跑道和起降空域要求小的地方, “CW-20 大鹏”也能进行作业。

(三) 研究的主要内容

本课题主旨设计一款既拥有旋翼机稳定垂直起降功能, 又兼具固定翼长航时、远航程优势的小型无人机。采用目前较为成熟的多旋翼和固定翼结合的形式, 合理设计布局形式。利用 SolidWorks 软件构建模型, 并对其进行力学与运动学分析。查阅文献归纳总结并分析各自的特性和技术瓶颈, 从而为进一步的研究设计和性能分析提供依据。

本课题主要研究的内容如下:

(1) 分析旋翼与固定翼无人机特征, 并根据其特征和性能完成垂直起降固定翼无人机结构设计。

(2) 设计合理的垂直起降固定翼无人机布局形式, 利用 SolidWorks 软件完成模型的构建, 并进行整体装配。

(3) 通过软件完成力学与运动学分析, 验证该机构的可行性。

参考文献

[1] 王科雷, 周洲, 马悦文等. 垂直起降固定翼无人机技术发展及趋势分析[J/OL]. 航空工程进展:1-13[2021-11-23].

[2] 雷志荣, 赵超, 秦玮等. 10kg 尾座式垂直起降固定翼无人机系统[J]. 航空兵

器, 2020, 27(06):43-48.

- [3]包荣剑. 林用小型垂直起降固定翼无人机的设计研究[D]. 东北林业大学, 2019.
- [4]Jing Zhu, Qun Gu, Li Liu. Requirements for Application of China's Vertical Takeoff and Landing UAV in Maritime Supervision[P]. Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Automatic Control and Information Engineering (ICACIE 2017), 2017.
- [5]王珂, 李晓甜. 垂起固定翼无人机高速公路无人值守巡检系统应用研究[J]. 江苏科技信息, 2021, 38(25):56-58.
- [6]贺玺睿. 垂直起降固定翼电力巡线无人机飞控系统的设计[D]. 东北农业大学, 2020.
- [7]高洪波, 苏周, 张兆海. 垂直起降固定翼无人机发展趋势分析[J]. 科技创新导报, 2019, 16(22):232+237.
- [8]于进勇, 王超. 垂直起降无人机技术发展现状与展望[J]. 飞航导弹, 2017(05):37-42.
- [9]刘媛媛. 垂直起降固定翼无人机设计、控制与试验[D]. 南京航空航天大学, 2018.
- [10]张飞. 垂直起降固定翼无人机研究[D]. 南昌航空大学, 2019.
- [11]杨传广, 马铁林, 甘文彪等. 垂直起降固定翼无人机技术特点浅析[C]//2017年(第三届)中国航空科学技术大会论文集(下册)., 2017:61-66.
- [12] Thamm H P, Brieger N, Neitzke K P, et al. SONGBIRD--- An innovative UAS combining the advantages of fixed wing and multi rotor UAS [C]//International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics. Toronto, Canada, 2015, 345-349.
- [13] D. Wyatt, Bell Eagle Eye UAV Pocket Guide[M]. Fort Worth, TX: Bell Helicopter Textron, Inc. 2004.

二、进度及预期结果

起止日期	主要内容	预期结果
2021.9.16-2021.11.15	查阅文献, 收集文献, 学习相关知识	查阅到相关资料, 并且掌握了部分知识
2021.11.16-2021.11.29	对查阅的知识进行分析整理, 详细的了解其内容并根据论文题目, 完成开题报告与任务书	完成开题报告与任务书
2021.11.30-2022.2.15	根据查阅的资料, 利用软件构建设计模型	完成设计的模型构建

天津中德应用技术大学
本科生毕业设计（论文）的声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本毕业设计（论文）的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本毕业设计（论文）原创性声明的法律责任由本人承担。

毕业设计（论文）作者签名：



2022年6月3日

本人声明：该毕业设计（论文）是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过设计（论文）的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

毕业设计（论文）指导教师签名：

年 月 日

摘 要

垂直起降固定翼无人机以旋翼的方式垂直飞行起落和固定翼方式前飞,可进行垂直起降,实现在高空中盘旋和定点悬停,也可实现中远程航行。与传统固定翼无人机和旋翼无人机相比,二者复合后可以定点起降和悬停,对机场跑道没有限制,同时具备了航行远、航时长等特点,任务能力在前基础上明显提高。基于以上特点,垂直起降固定翼无人机可适用于任务要求高的场景和复杂环境中。

本文通过对目前垂直起降固定翼无人机的发展现状和性能分析,运用SolidWorks软件三维建模设计一款新型垂直起降固定翼无人机,使其结合旋翼无人机对起降场地依赖小的特点还增加了固定翼无人机的飞行特点,并且通过软件对其进行有限元分析,验证其可行性,在后续中进一步提高垂直起降固定翼无人机的性能。

再次对已经完成三维建模的结构进行整体的装配,同时也对无人机的部分结构,如机翼、尾翼、起落架进行静力学实验分析,验证了该结构的可行性。

由于本文设计中机翼和旋翼的结合方式特别,为达到垂起的功能在两侧机翼上各开一个圆形孔,会直接影响无人机的气动性和机翼的整体强度,在理论和研究上没有太多的借鉴,对于这种机翼开孔的设计,在设计合理计算上和气动分析上会有较大的困难。本文中对机翼开孔设计进行了一个简单的气动分析,验证其是否满足飞行要求。

在通过一系列的研究设计及分析后,完成了本垂直起降固定翼无人机的设计。运用软件完成了三维建模和整体的装配,同时对重要结构进行了静力学实验分析,验证了无人机的重要结构满足其设计要求。计算了旋翼产生的拉力,足够实现无人机的垂直起降。最后对机翼的气动性进行分析,验证了无人机能够实现正常飞行。

关键词: 垂直起降; 固定翼无人机; 无人机设计

ABSTRACT

Vertical take-off and landing fixed-wing UAV in the form of rotor vertical flight take-off and landing and fixed-wing way forward, can carry out vertical take-off and landing. Hovering and hovering at a high altitude can also be achieved for medium- and long-range navigation. Compared with the traditional fixed-wing UAV and rotary wing UAV, the two can be fixed point take-off and landing and hovering after the combination, and there is no restriction on the airport runway. At the same time, it has the characteristics of long voyage and long sailing time, and the task capability has been significantly improved on the basis of the previous. Based on the above characteristics, VTNs can be applied to scenarios and complex environments with high mission requirements.

Through the analysis of the development status and performance of the current vertical take-off and landing fixed-wing UAV, this paper uses SolidWorks software to design a new type of VT and fixed-wing UAV, so that it combines the characteristics of the rotor UAV with the small dependence on the take-off and landing site and also increases the flight characteristics of the fixed-wing UAV. And through the software to its finite element analysis, verify its feasibility, in the follow-up to further improve the performance of vertical take-off and landing fixed-wing UAV.

Again, the structure that has been modeled in 3D is assembled as a whole. At the same time, static experiments were also carried out on some structures of the UAV, such as wings, tails and landing gear, which verified the feasibility of the structure.

Due to the special combination of wings and rotors in the design of this article, in order to achieve the function of hanging, a circular hole is opened on each side of the wing, and will directly affect the aerodynamics of the UAV and the overall strength of the wings. There is not much reference in theory and research, for the design of this kind of wing opening, there will be greater difficulties in design reasonable calculation and aerodynamic analysis. In this paper, a simple aerodynamic analysis of the wing cut-out design is performed to verify that it meets the flight requirements.

After a series of research design and analysis, the design of the vertical take-off and landing fixed-wing UAV was completed. The software was used to complete the 3D modeling and the overall assembly. At the same time, static experimental analysis of important structures was carried out, and the important structures of UAVs were verified to meet their design requirements. The tensile force generated by the rotor is

calculated, which is enough to achieve the vertical take-off and landing of the drone. Finally, the aerodynamics of the wings were analyzed to verify that the drone could achieve normal flight.

Key words: Vertical take-off and landing; Fixed-wing drones; Drone design

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题背景意义	1
1.2 国内外研究现状及发展趋势	1
1.2.1 国外研究现状	2
1.2.2 国内研究现状	3
1.2.3 垂直起降固定翼无人机发展趋势	3
1.3 应用场景	4
1.4 课题主要功能和内容	4
第二章 总体设计方案	5
2.1 垂起无人机总体布局及设计参数	5
2.1.1 总体布局	5
2.1.2 设计指标	5
2.2 局部结构设计	5
2.2.1 机翼设计	5
2.2.2 尾翼设计	5
2.2.3 机身设计	6
2.2.4 起落架设计	6
2.3 设计创新性	6
2.4 本章小结	6
第三章 垂起固定翼无人机建模	7
3.1 机翼三维建模过程	7
3.2 尾翼三维建模过程	8
3.3 机身三维建模过程	9
3.4 起落架三维建模过程	10
3.5 副翼、垂尾及方向舵建模	11
3.5.1 副翼三维建模过程	11
3.5.2 垂尾三维建模过程	11
3.5.3 方向舵三维建模过程	12
3.6 装配结果	12

第四章 无人机局部有限元分析	13
4.1 分析的边界条件.....	13
4.2 机翼的静力学实验分析.....	13
4.2.1 机翼的相关参数和材料选择	13
4.2.2 机翼的应力应变情况分析	13
4.3 尾翼的静力学实验分析.....	16
4.3.1 尾翼的相关参数和材料选择	16
4.3.2 尾翼的应力应变情况分析	16
4.4 起落架的静力学实验分析.....	18
4.4.1 起落架的相关参数和材料选择	18
4.4.2 起落架的应力应变情况分析	18
4.5 机翼的气动分析.....	19
4.6 本章小结.....	20
第五章 总结与展望	22
参考文献.....	23
致 谢.....	24

第一章 绪论

1.1 课题背景意义

垂直起降固定翼无人机是兼固定翼无人机航时长、速度快、距离远的特点和多旋翼无人机垂直起降能力的飞行平台^[1]，通过携带各种任务载荷，可以进行各种中长时间、远距离侦察任务。该型无人机系统能满足更为复杂的应用场合，具有成本较低廉、操纵简易、储运方便、对环境适应能力较强等特点，是当前国内外民用无人机研发领域的热点。

近年来，因其民用情况、环境监测、安全监测等任务，人们对无人机的性能需求越来越高。垂直起降固定翼无人机是近几年的不断发展的热点对象，且垂直起降固定翼无人机同时拥有旋翼和固定翼两者的特点，以其简单方便的起飞降落方式又可高速前飞、飞行时间长久等优势^[2]，在多个领域都会利用到它。目前垂直起降固定翼无人机逐渐成为无人机中的新宠，正逐步取代多旋翼无人机，深得各行各业的喜爱。

垂直起降技术从诞生到现在已经经历了数十年的发展，从最初的应用于军事领域到现在不断的向民用领域转化，特别是在无人机的使用方面，垂降无人机可以在海、陆各个领域为民为军完成各项高难度工作^[3]，给人们带来了更多的便利。垂直起降固定翼无人机跑道的要求不高，在民用上，因可随时起降，可以保证在城市、农村不同的地区进行作业，以完成高危和高难度的工作，实现工作的大规模科技化。如今在军用方面更是如虎添翼，运用广泛。现在军事上可实现察打一体和舰载作战，而在海上军舰上起飞降落操作，对于提高海军预防外敌具有独特优势^[4]，其可以及时反馈与及时作战，更好地保护国家的领土完整。

垂直起降固定翼无人机也是近几年无人机行业新宠机型之一。到目前，行业里大小生产制造垂直起降固定翼无人机的商企已很多家，且不少无人机商企已将垂直起降固定翼技术作为主打与核心技术^[2]。面向无人机的一系列职业都逐步的发展起来，这些都能说明垂起无人机的发展会带来更多的机遇，需要更多的人才加入到此领域。在未来对于垂起无人机会会有越来越多的研究和创新。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

由于多旋翼在任务要求，特别是在航程、航时等方面难以满足越来越严格的社会需求。自上个世纪起，人们就开始不断设计研究，寻求研发一种结合固定翼和旋翼特点的新型无人机技术^[5]。近年来，由于技术的不断发展，垂直起降固定

翼无人机成为现实，从军方用品逐步转移普及到日常生活中。

1.2.1 国外研究现状

2020 年垂直起降无人机更快加速了军事方面的应用。因其对起降的场地依赖性小，能更好的适应各种复杂环境，因此美国将垂直起降一类飞行器标定为美军十大未来重要军品设备之首^[6]。由美国贝尔公司研制的“鹰眼”倾转旋翼无人机如图 1-1，是早期研发的一款典型的垂直起降固定翼飞机^[4]。同年，美空军发布“敏捷至上”项目，极力推进电动垂直起降无人机在军方的多种应用，目前已有较多的企业都参与到其中，且现已经完成设计进入了实验试飞时段。



图 1-1 “鹰眼”倾转旋翼无人机

SONGBIRD500 系列是由德国 Aerolution 公司研发的一款固定翼结合旋翼的垂直起降无人机，也是采用复合翼垂直起降的方案。SONGBIRD500 在正常天气情况下空中航时可达到 1 小时，在飞行前的安装过程操作较简单，大概十分钟之内可完成，这使其成为了一款非常高效率与多任务型的无人机。美国 Martin UAV 公司的 V-BAT 无人机如图 1-2 同样是垂起类无人机，其采用尾座式垂直起降形式，是一款能够从垂直起降过渡到水平固定翼飞行的无人机系统，其底部的涵道风扇使无人机可以垂直起飞降落，升空后可以自动转换，成水平飞行模式像正常飞机一样飞行。尽管是在地形困难的地区飞行，飞机仍能够从起飞过渡到垂直悬停，并具有持续的凝视能力，同时保持通信数据传感器的流畅性。



图 1-2 V-BAT 垂直起降固定翼无人机

1.2.2 国内研究现状

2018 年 11 月在珠海航展上，航天十一院研发的彩虹-10 无人倾转旋翼机，如图 1-3 赫然出现在航展上，其采用了倾转旋翼飞行器技术，也是可以通过倾转旋翼实现垂直起降的无人机，展示了我国对无人倾转旋翼机和垂起固定翼一类无人机的不断进步和发展^[3]。



图 1-3 彩虹-10 无人倾转旋翼机

而旋翼结合固定翼形式的无人机，其中的典型无人机有纵横股份“CW 大鹏”系列^[4]，彩虹 CH804D 等。2015 年成都纵横对外发布 CW-20 大鹏无人机，采用固定翼与旋翼复合形式，以常规固定翼飞行器形式为基础，分为在低速状态下或者起降时在高速状态下或者高速飞行时，分别按照多轴模式飞行和固定翼模式巡航飞行。CW-20 大鹏无人机兼具固定翼与旋翼两者的功能，在其他固定翼难以使用的复杂环境和建筑物密集的区域，或者不需要跑道和起降空域要求小的地方，“CW-20 大鹏”也能正常的进行作业，其展示出了我国的垂起固定翼无人机的研制水平。

厦门云轮智能科技有限公司发布的 Mugin3600 无人机是一款垂直起降无人机燃油固定翼无人机，还有其公司的 Mugin2930MM 垂直起降固定翼电动无人机如图 1-4 等，都是已经成型且可实现垂直起降的固定翼无人机，并且已经实现了大量生产和销售的良好状态。



图 1-4 Mugin2930MM

1.2.3 垂直起降固定翼无人机发展趋势

随着无人机研制水平的不断发展,垂直起降固定翼无人机的研制水平开始向着更高阶段发展,出现更智能、更可靠的现象。且许多的高科技已经开始实施在垂直起降固定翼机型制造中,且大众也可以根据自身的喜好和对功能的要求来设计和改造一款符合自己要求的垂起无人机^[7]。随着人们对“小”与“轻”设计理念的执着追求,其尺寸也可以做到更小。小型无人机用“小”与“轻”的一大特点,逐渐替代大型无人机在军事方面的应用,在经济方面也比较低廉。人们对无人机技术的不断深入研究,使垂直起降固定翼无人机在原来的水平上,任务能力与飞行性能有了一个质的飞跃和提升,适合领域与用途变得更广泛^[4]。这些都极大的扩展了无人机应用范围和今后的普遍性,相信在未来不仅仅应用于农林业、测绘、救援等众多领域,而普及于我们意想不到的领域^[8]。

1.3 应用场景

海事应用,海事巡逻和海事救助^[5],运用垂起固定翼无人机无需跑道对海事巡逻船不能到达海域进行监测和搜救,快速实施海事救助。同时也可以检查海洋航标航线等工作。特殊情况,其也可以携带物资进而投放,清除海洋上的污染物或投放降解物等。

林业应用,民用上可用于林业防护,森林起飞场地环境差的条件下,而小型垂起固定翼无人机可以满足在林用中的各种任务要求^[9],进而对林业进行防护,完成森林积量、树种判别等工作,以及环境监测等。森林巡逻和搜救方面,垂起固定翼无人机更是用途突出,应用于森林防火、监控盗伐、人员搜救等,它对灾情准确定位且准确判断,用于应急救援,快速实施灾情救助有很大的作用。

交通、电力巡查应用,针对高速公路定期巡检作业的需求^[10],垂直起降无人机支持远程起降功能,以实现对高速公路长距离路段自动化巡检工作。对于危险且具有难度的电力巡线工作^[11],垂起固定翼无人机可以完成高难度的电力巡线,给电力巡线带来便利。

1.4 课题主要功能和内容

本课题的垂直起降固定翼无人机是兼固定翼无人机特点和多旋翼无人机垂直起降的能力的无人机,通过搭载不同任务载荷,实现垂直起降,从而执行多种特定任务。

本课题主要研究的内容如下:

(1) 分析旋翼与固定翼无人机特征,并根据其特征和性能完成垂直起降固定翼无人机结构设计。

(2) 设计合理的垂直起降固定翼无人机布局形式,利用 SolidWorks 软件完成模型的构建,并进行整体装配。

(3) 通过软件完成力学与运动学分析,验证该机构的可行性。

第二章 总体设计方案

2.1 垂起无人机总体布局及设计参数

2.1.1 总体布局

采用固定翼与旋翼复合式设计，旋翼建立在固定翼之中^[12-13]，以保证无人机的垂直起降和空中悬停，尾部设计有螺旋桨，可以使无人机推进前飞，来增加无人机的航时和航程。具备副翼、垂尾、升降舵和方向舵，可使无人机偏转方向、做横滚操作和俯仰操作。机身作流线型设计，以减小飞行中的阻力。

2.1.2 设计指标

- a) 翼展：1642mm；
- b) 机长：920mm；
- c) 机翼表面积：318097 mm²；
- d) 尾翼表面积：149119 mm²；
- e) 最大起飞重量：8kg；
- f) 飞行速度：50m/s；

旋翼桨叶数 3，旋翼直径 80mm，螺距 52mm，最大桨宽为 12mm，内部与外部的加强结构为铝合金结构件，旋翼为碳纤维复合材料。

计算旋翼所产生的拉力，其公式为：直径（米）*螺距（米）*桨宽度（米）*转速²（转/秒）*1 大气压力（1 标准大气压）*经验系数（0.25）=拉力（kg）。设置转速为 6000r/min，代入数据得到拉力为 10.4kg，而设计垂起固定翼无人机最大起飞重量为 8kg，则满足要求。

2.2 局部结构设计

2.2.1 机翼设计

根据设计的内容和目的，希望垂直起降无人机可以携带一定的载荷，且拥有机翼与旋翼提供升力，一定程度上也增加了重量。为了减轻系统重量，阻力也不能太大，且主机翼为中空形式，其机翼的强度也有所减小，则翼型的最佳选择为平凸翼型^[14]。

2.2.2 尾翼设计

尾翼部分设计有垂尾、方向舵和升降舵，尾翼翼型也选择为平凸翼型。方向舵与升降舵来实现无人机在飞行过程中改变方向和俯仰操作。垂尾翼对整架飞机来说，也是一个很重要的部分，垂直尾翼一定程度上决定了飞机的纵向稳定性，而速度对垂尾的大小也有一定的影响，一般情况下面积较大的垂直尾翼，会拥有更为良好的纵向稳定性^[14]，本文垂直起降固定翼无人机垂直尾翼面积为 43602 平方毫米，对于垂直尾翼的形状影响，随意性较大。

2.2.3 机身设计

许多飞机机身的气动外形设计原则，都会选择空气阻力小的一种外形结构，需要设计成流线型，所以本设计中为提高和改善飞机的飞行品质，很多机身设计为流线型，使本无人机在飞行时能减小阻力，增加飞行时的速度。

2.2.4 起落架设计

起落架对无人机的起落操控也是非常重要的一部分，并且起落架在飞机降落过快时所受的冲击非常大，起落架的存在对无人机来说也是需要起到缓冲的作用。本文中起落架按照常规的形态设计，使用加强材料，增强起落架的强度等。在起飞降落时使其对本无人机起到一个较好的缓冲作用，保护无人机不受冲击力损坏。

2.3 设计创新性

垂直起降固定翼无人机，采用固定翼和旋翼复合式布局设计，整体气动布局设计机翼尾翼、双方向舵，推进式布局，旋翼安装于固定翼之中，两侧机翼各开一个圆孔^[15]，其布局不同于其他同类垂起固定翼无人机，具有一定可靠性和便捷操纵性等特点，可在 2m×2m 范围内垂直起飞，4m×4m 范围内垂直降落。后续若采用高可靠性工业级导航飞控系统，可实现全自主飞行，且飞行中可随时更改航线设置，同时按照指令要求完成任务载荷功能控制，完成任务后无人机可自主着陆。

2.4 本章小结

通过文献查阅和资料分析对无人机的整体布局进行了设计，同时也对无人机的结构进行设计，如机翼、尾翼等，均采用平凸翼型。机翼中开孔用于安装旋翼使无人机能完成垂直起降，同时无人机尾部有螺旋桨，推进无人机向前巡飞。给出垂起固定翼无人机的部分设计指标，如翼展、机长和飞行速度等，同时给出旋翼的部分指标，设定无人机最大起飞重量为 8kg。旋翼是实现垂起的主要部件，为使其实现垂起计算了旋翼在转速为 6000 r/min 的情况下，产生的拉力大小，最后得出拉力大小为 10.4kg，小于整体无人机的最大起飞重量，可以实现垂起。

第三章 垂起固定翼无人机建模

3.1 机翼三维建模过程

利用 SolidWorks 软件建模，选择基准面，打开草图绘制机翼剖面草图，合理运用弧线和曲线画出封闭式机翼剖面如图 3-1。

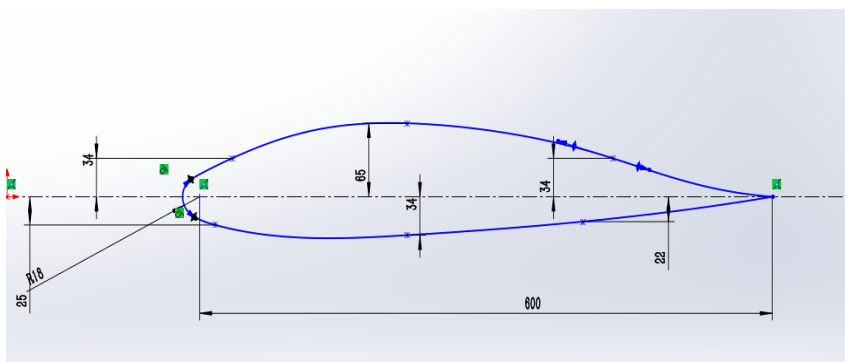


图 3-1 机翼剖面草图

退出草图拉伸机翼剖面，给定深度拉伸至 0.01mm，便于后续的操作，并缩小机翼剖面比例，机翼剖面统一比例缩放 0.8（软件上方“插入”中的“特征”选项，其中有缩放比例）。绘制引导线图，因翼长为 700mm，设引导线长为 1000mm，通过计算，偏转角为 18° 时机翼面积足够，所以偏转角设为 18° 如图 3-2，绘制此引导线便于后续的机翼翼展拉伸。新建立一个基准面，在软件上端参考中选择基准面，以机翼剖面为第一参考，新建基准面。进行镜向，将首个机翼剖面以新建基准面为镜向面，将剖面镜向到新基准面的另一边。以引导线为基准建立坐标系，并统一缩放一边的机翼剖面，通过计算统一缩放比例 0.353，将一边的机翼剖面缩小，机翼才能体现偏转角。

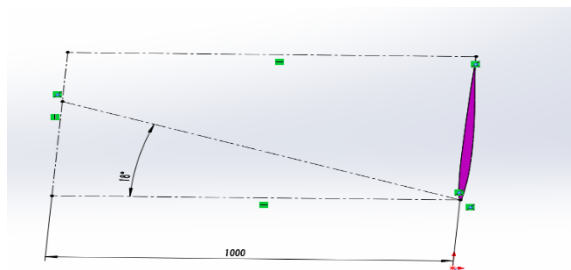


图 3-2 拉伸引导线

放样机翼，在两次缩放比例的基础上，再根据机翼两边剖面和引导线放样（在特征中选择放样凸台/基体）机翼，如图 3-3。

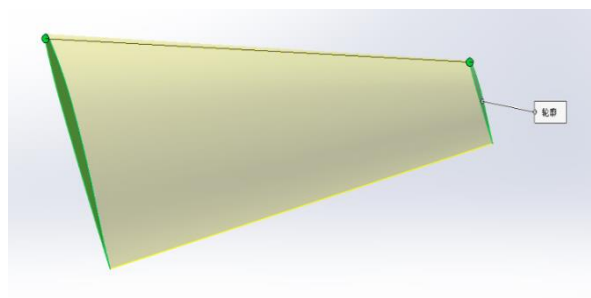


图 3-3 机翼放样图

选择基准面绘制草图，参考国外固定翼开孔设计文献^[12-13]圆直径为 280mm 做切除拉伸开孔设计，并拉伸内圆台方便旋翼的安放。绘制并拉伸支撑杆，连接机翼与圆台，固定旋翼的安装位置，并阵列出四个连接杆。再绘制机翼与机身的连接处如图 3-4，最后将连接处优化设计，选择三个面进行倒圆角，切线延伸。

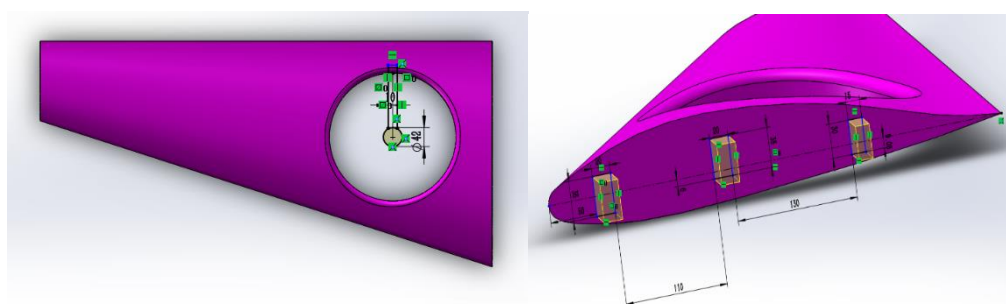


图 3-4 绘制与拉伸

绘制副翼形状并打孔，便于副翼与机翼的连接。将机翼以一定的比例缩小，统一缩放比例 0.7，新建基准面将整个机翼关于基准面镜向，如图 3-5。

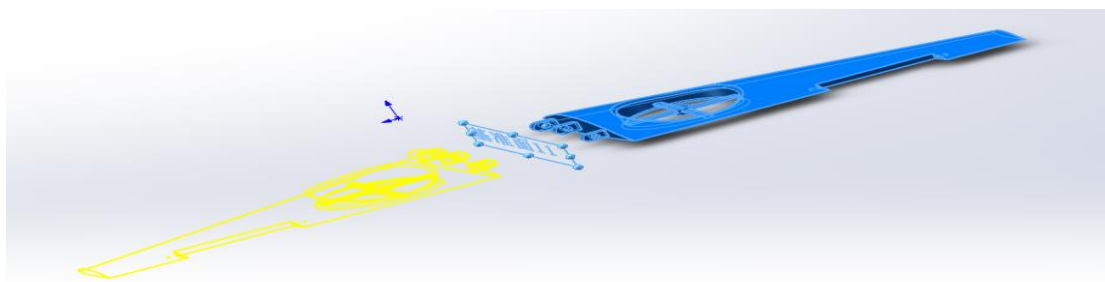


图 3-5 机翼镜向

3.2 尾翼三维建模过程

将尾翼的轮廓数据导入到 SolidWorks 软件中，在软件的最上方选择打开，然后找到尾翼剖面轮廓数据文件导入。剖面轮廓曲线导入后利用此轮廓凸台拉伸尾翼，参考国内对对垂起固定翼设计文献，给定深度 800mm，再将其缩放比例，统一缩放 0.56，得到尾翼^[16]。再绘制与拉伸尾翼与机身连接处，便于螺栓连接。绘制凸台，为增强结构连接强度，拉伸凸台，便于后续中尾翼与垂尾的连接。新

建基准面，使尾翼剖面向前移动 85mm 建立一个基准面，并根据此基准面镜向形成尾翼的另一侧，如图 3-6。

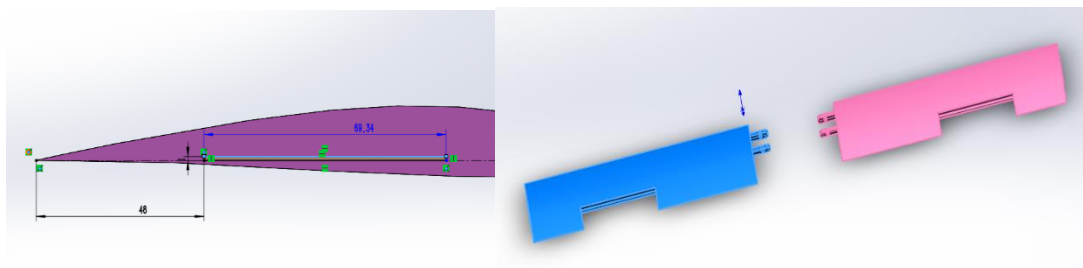


图 3-6 连接处绘制与机翼镜向

3.3 机身三维建模过程

根据右视基准面构建新基准面，绘制机身草图，根据两个新建基准面，分别画出机身两端的形状，分别为两个圆形，参考无人机设计文献设置前端圆直径为 42.43mm，机身后端的圆直径为 100mm，使用前视基准面，再用曲线连接机身的两端，分别都与两圆相切驱动^[16]。使用上视基准面，用曲线连接机身两端，如图 3-7。根据绘制的草图将机身放样，机身两端的草图为轮廓，前视基准面和上视基准面的曲线为引导线放样机身。

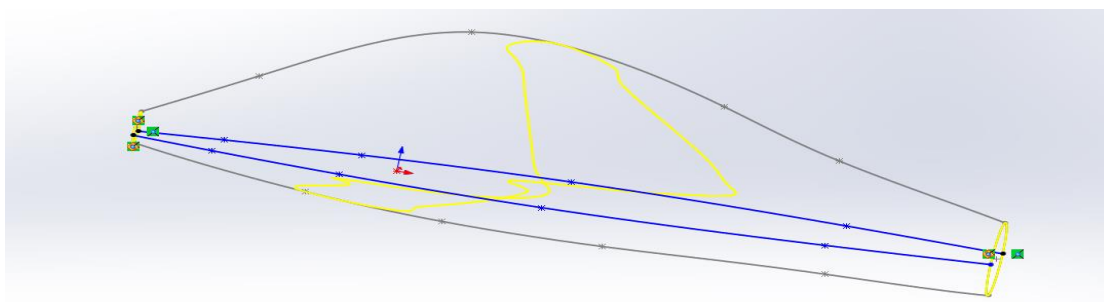


图 3-7 机身草图绘制

建立机身与机翼的连接处，绘制草图根据机翼、尾翼的剖面绘制出连接处的草图轮廓，再根据轮廓拉伸实体，便于机翼、尾翼与机身的连接如图 3-8。新建基准面绘制一条水平的构造线，再绘制线条，其两条线夹角为 60° 有一个同端点，此角度便于无人机的停放起降。在前视基准面上以两条线的端点为圆心绘制圆。以上述实线为路径，以绘制的圆为轮廓切除拉伸圆孔，镜向其他连接孔，得到起落架连接孔。

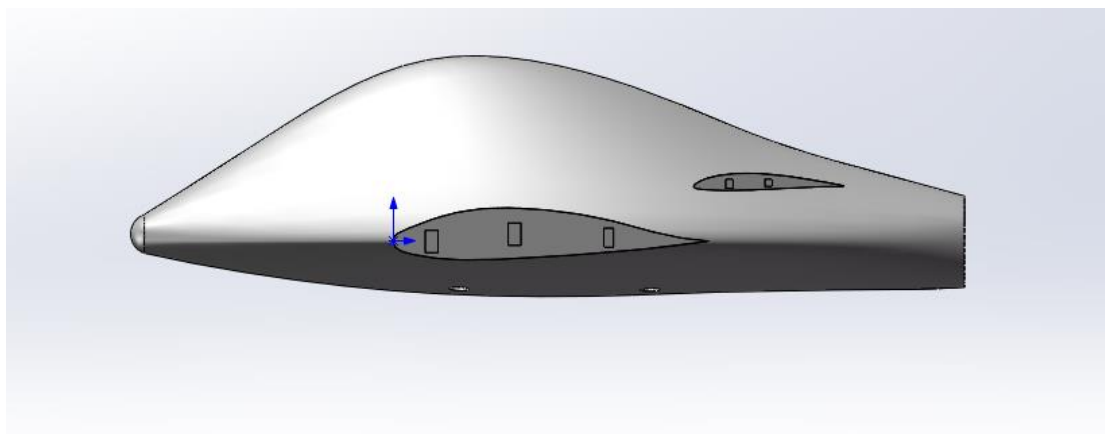


图 3-8 机身图

3.4 起落架三维建模过程

绘制拉伸起落架杆，根据国内无人机起落架设计文献，新建基准面绘制一条水平的构造线^[17]，再绘制线条，为使其与机身上的圆孔连接上，两条线夹角为 120° 有一个同端点。根据设计要求，在前视基准面上以两条线的端点为圆心画一个直径为 30mm 的圆。再以实线为路径，以绘制的圆为轮廓扫描出起落架与机身的连接杆，并以右基准面为镜向面，将扫描体镜向到另一侧，如图 3-9。

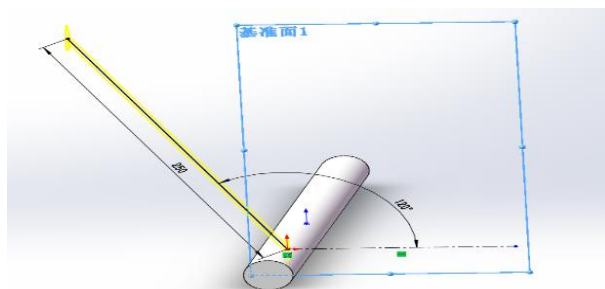


图 3-9 连接杆的绘制与扫描

根据前视基准面倾斜 30° ，以圆柱的轴为参考新建基准面，在圆柱的一端边线上绘制草图直径为 30mm 的圆。在新建的准面上以绘制的圆心为起点绘制弧形线，扫描实体以弧线为路径扫描得到实体，如图 3-10。镜向将扫描体镜向到另一端。同时缩小实体，统一比例缩放 0.7，得到整体的起落架。

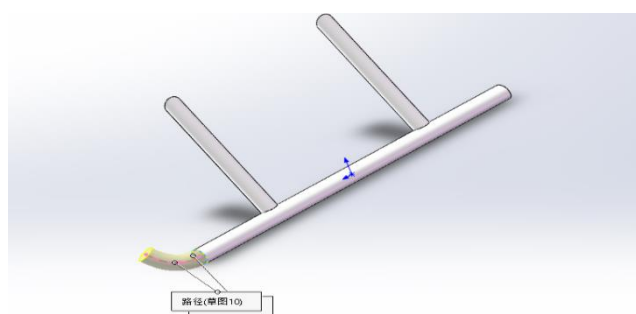


图 3-10 起落架两端的绘制与扫描

3.5 副翼、垂尾及方向舵建模

3.5.1 副翼三维建模过程

将主机翼的剖面草图导入凸台拉伸得到实体，并统一比例缩放 0.3。根据主机翼的剖面图描出后半部分 70mm 处的草图描出并封闭，凸台拉伸 290mm，再将机翼的前半部分拉伸出来的实体切除。在拉伸出来的副翼实体侧面绘制一个直径为 8mm 的圆，并切除拉伸实体完全贯穿到另一侧面，如图 3-11。最后将副翼实体统一比例缩放 0.7。

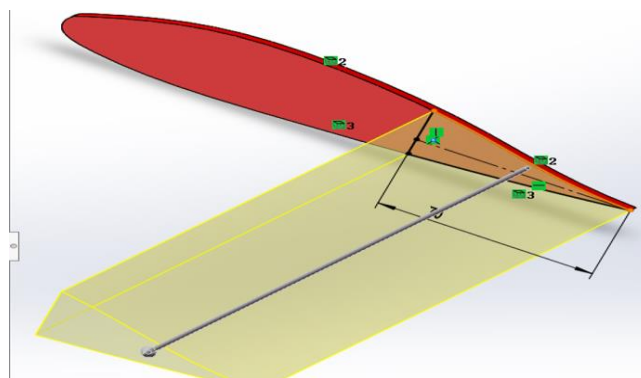


图 3-11 副翼绘制与拉伸

3.5.2 垂尾三维建模过程

将翼型导入到软件中得到剖面草图，垂直绘制一条构造线建立坐标系，再利用翼型剖面草图轮廓拉伸机翼，拉伸至 0.001mm，再统一比例缩放 0.4。此时绘制导入的机翼轮廓，以此草图面和拉伸缩小的机翼面为轮廓放样垂尾，如图 3-12。

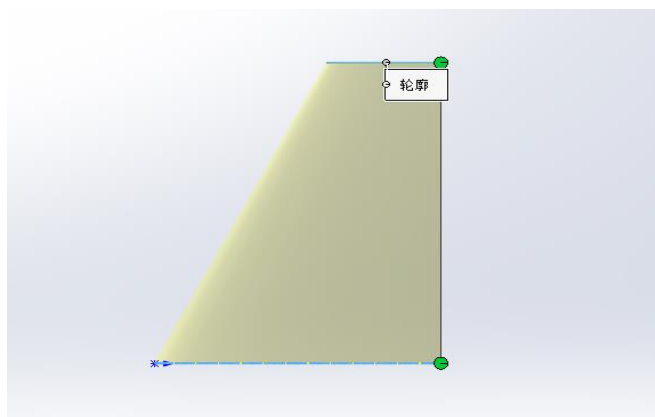


图 3-12 垂尾绘制与放样

建立草图绘制垂尾与方向舵连接的部分，参考国内固定翼设计文献，绘制 30mm*60mm 形状大小的草图并切除拉伸至完全贯穿^[18]。此时统一比例缩放 1.68。在切除拉伸的侧面绘制一个直径为 4mm 的圆并拉伸至另一面。选择上视基准面在垂尾的下部分绘制与尾翼剖面一致的翼型并切除拉伸，便于垂尾与上机翼的连接，如图 3-13。

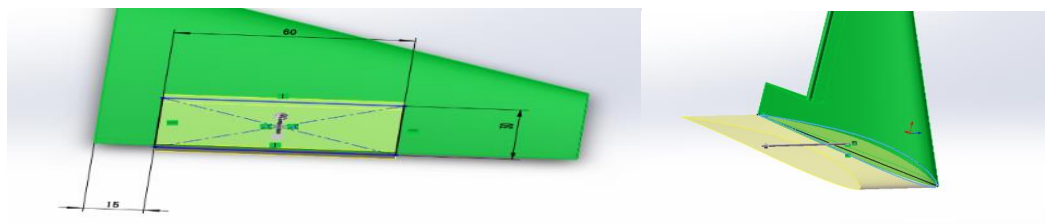


图 3-13 垂尾连接处绘制与拉伸

3.5.3 方向舵三维建模过程

绘制一条水平构造线，在选择 30mm 长之处绘制与垂尾后半部分一致的草图，再拉伸草图，此时统一比例缩放 1.68。在方向舵两侧绘制一个直径为 4mm 的圆再切除拉伸至方向舵的另一侧，如图 3-14，便于垂尾与方向舵的连接。

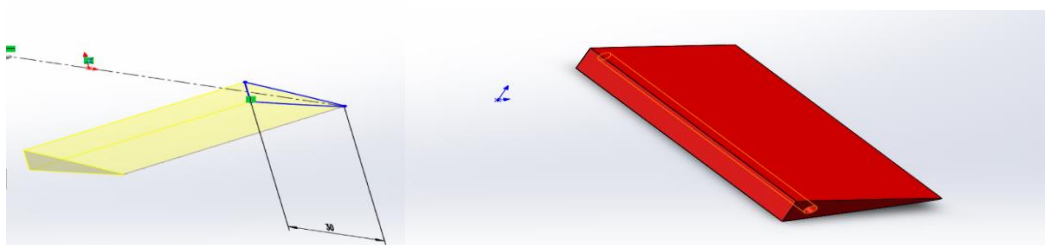


图 3-14 方向舵绘制与拉伸

3.6 装配结果

通过 SolidWorks 软件将各零件装配到一起，得到装配体如图 3-15。

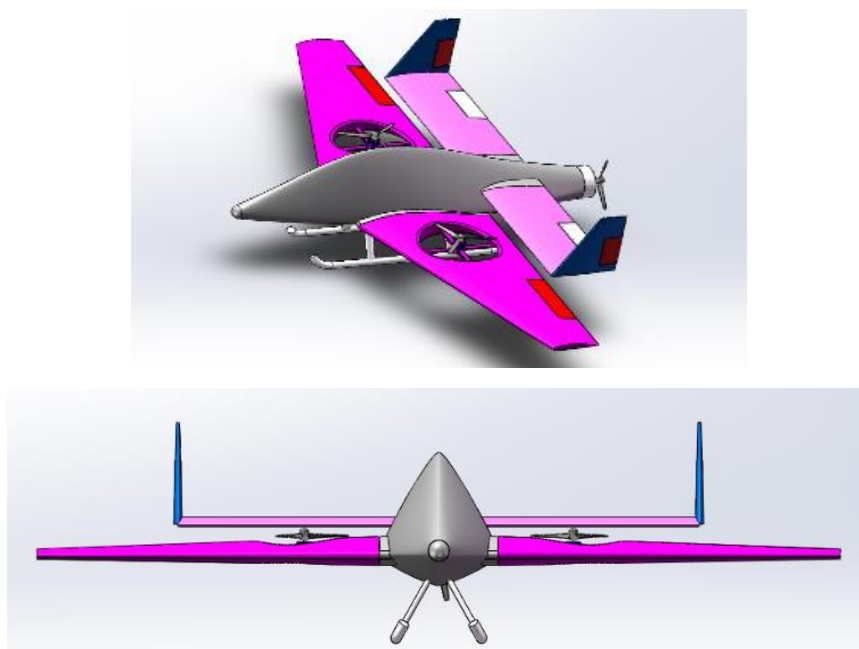


图 3-15 设计结果图

第四章 无人机局部有限元分析

4.1 分析的边界条件

由于对分析的技术有限,将本设计中的模型进行分析时采用最简单的模式下进行分析,边界条件均为室内静风条件下。

4.2 机翼的静力学实验分析

4.2.1 机翼的相关参数和材料选择

由于机翼是整个模型中重要的承力部件,所以本文选择对模型的机翼进行静力学实验分析。为了方便对机翼进行下一步地研究,下面对机翼的尺寸进行了总结归纳,具体测量参数如表 4-1 和表 4-2 所示。

表 4-1 机翼几何相关参数

	翼长 (mm)	平均弦长 (mm)	展弦比	面积 (cm ²)
机翼	700	300	5.5	2471.5

机翼材料需要保证在结构安全性可靠的前提下做到越轻越好,考虑到这些因素影响,经过对不同材料的分析筛选,机翼材料最后选择的是轻木。此材料具体性能参数见下表 4-2。

表 4-2 轻木的性能参数

属性	数值	单位
弹性模量	2999999232	牛顿/m ²
中泊松比	0.29	不适用
质量密度	159.99	Kg/m ³
屈服强度	19999972	牛顿/m ²

4.2.2 机翼的应力应变情况分析

为了能够保证材料的性能参数满足机翼在正常飞行时的要求,本文将对模型处于起飞和平飞两种情况下的机翼进行静力学试验分析,并观察机翼的应力应变情况。

本实验中,我们使用的是显示结果明显,而且操作较为简单的 SolidWorks 软件里的 Simulation 插件对机翼进行静力学实验分析。

在起飞阶段主要由两个机翼上的旋翼提供升力，所以我们在安装旋翼的位置加载一个大小为 50N 的集中载荷；在平飞的阶段，升力主要由机翼的空气动力产生，两个旋翼起辅助作用，所以在机翼上加载一个大小为 40N 的分布载荷，在旋翼安装位置加载一个大小为 10N 的集中载荷。

首先我们要对机翼进行网格的划分处理，考虑到计算要求精度较高，所以我们将划分网格的密度选择为良好。统计可得，单元大小为 10mm，共存在 24655 个单元。具体划分参数如表 4-3；划分效果如图 4-1 和图 4-2 所示。

表 4-3 机翼的网格划分参数

算法名称	机翼静力学分析
网格类型	实体网格
所用网格器	标准网格
自动过渡	关闭
包括网格自动环	关闭
雅可比点	4 点
单元大小	10mm
公差	0.5mm
网格品质	高
节总数	40558
单元总数	24655

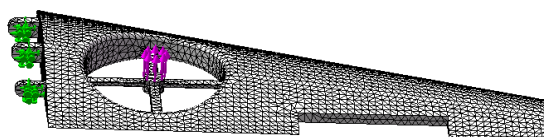


图 4-1 起飞时机翼网格划分效果图

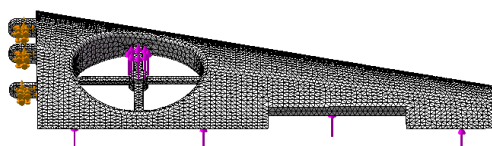


图 4-2 平飞时机翼网格划分效果图

通过上述的静力分析可得，起飞阶段机翼所承受的最大应力为

$5.760 \times 10^6 \text{N/m}^2$ ，平飞阶段机翼所承受的最大应力为 $5.364 \times 10^6 \text{N/m}^2$ ，远小于材料的屈服强度；与此同时，机翼的最大应变量为分别为 1.238mm 和 1.222mm，所以此机翼材料满足所需要的强度要求。图 4-3 与图 4-4 分别为起飞时机翼的应力应变图，图 4-5 与图 4-6 为平飞时机翼的应力应变图，具体的应力应变情况如下所示：

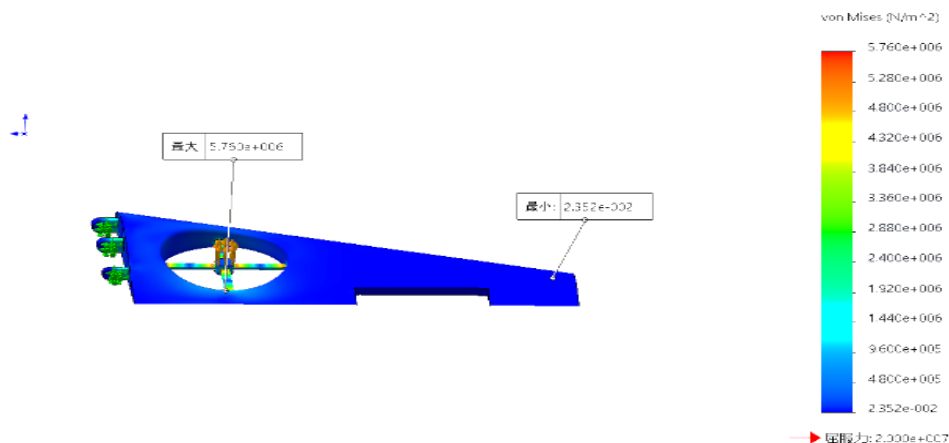


图 4-3 起飞时机翼的应力分布图

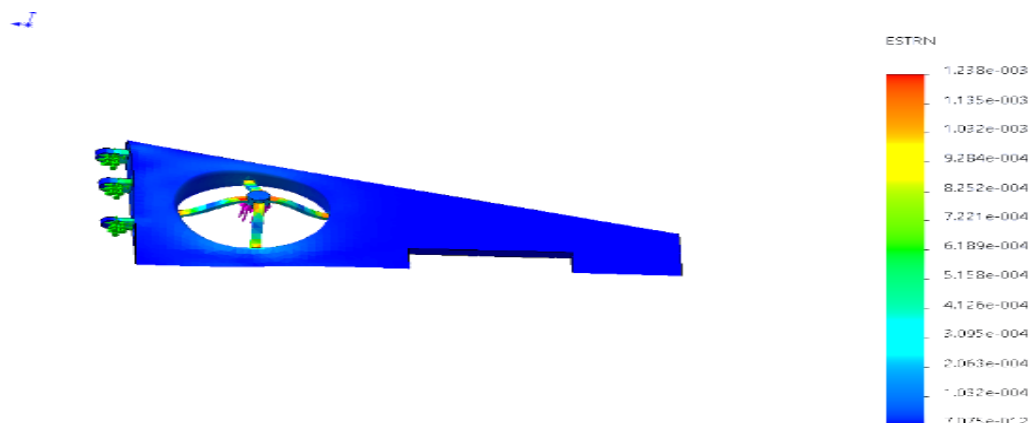


图 4-4 起飞时机翼的应变分布图

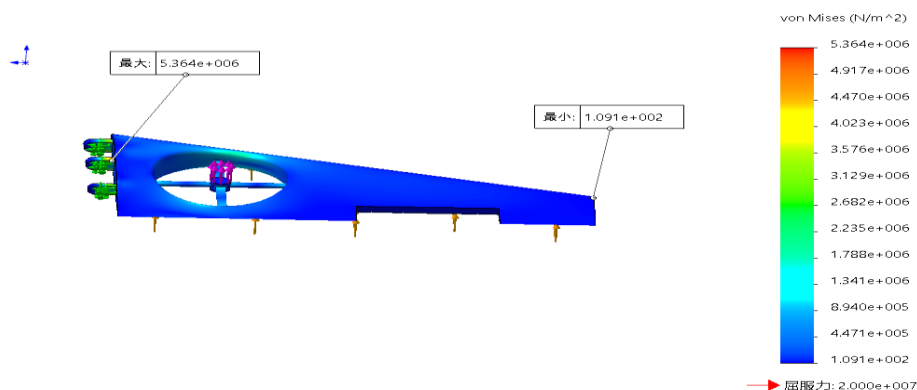


图 4-5 平飞时机翼的应力分布图

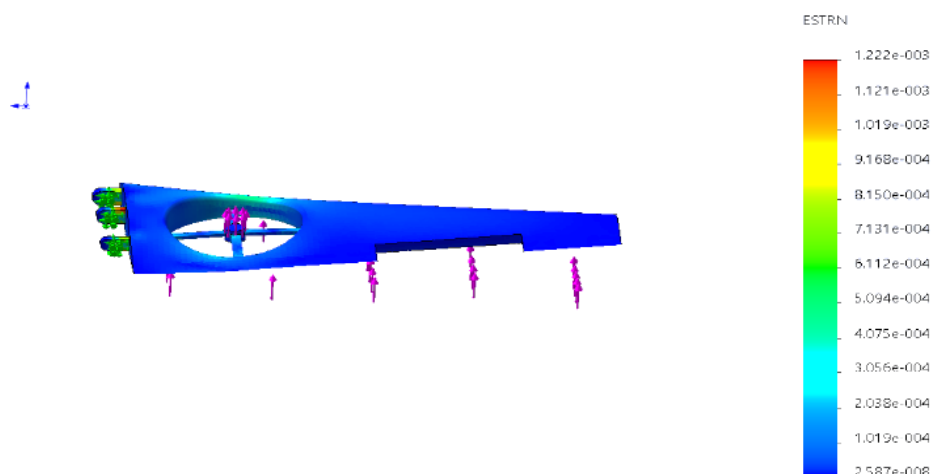


图 4-6 平飞时机翼的应变分布图

通过上述的静力学实验分析图,可以得出在机翼安装旋翼开口位置存在最大应力,所以应该考虑加强机翼的开口处。

4.3 尾翼的静力学实验分析

4.3.1 尾翼的相关参数和材料选择

由于尾翼也是重要的承力部件,尾翼的存在使得无人机重量增大,存在起飞速度低,距离短的特点,所以对模型的尾翼进行静力学实验分析。下面对尾翼的尺寸进行了总结归纳,尾翼翼展为 1066mm,具体测量参数见表 4-4 所示。

表 4-4 尾翼几何相关参数

	翼长 (mm)	平均弦长 (mm)	面积 (cm ²)
尾翼	448	140	1491.2

尾翼也选择的轻木作为尾翼材料,此材料具体性能参数与机翼相同。

4.3.2 尾翼的应力应变情况分析

为了能够保证材料的性能参数满足尾翼在正常飞行时的要求,下面对尾翼进行了静力学分析。尾翼加载一个大小为 10N 的分布载荷。

尾翼网格划分效果如图 4-7 所示。

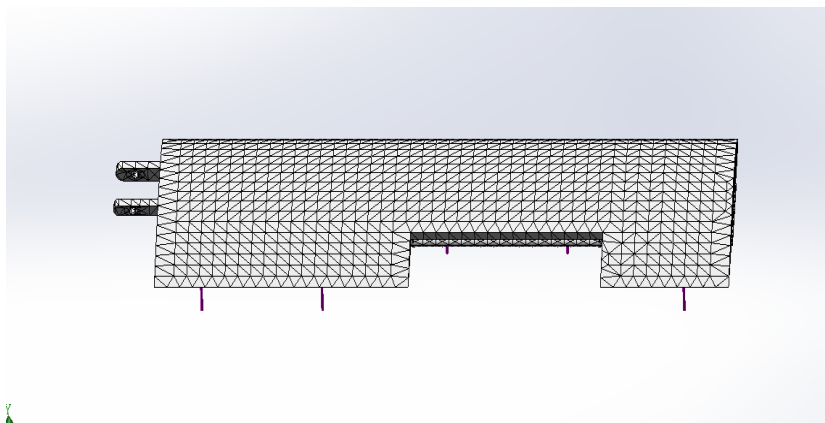


图 4-7 尾翼网格划分效果图

通过上述的静力分析可得，尾翼所承受的最大应力为 $3.323 \times 10^6 \text{N/m}^2$ ，远小于材料的屈服强度 $2.0 \times 10^7 \text{N/m}^2$ ，与此同时尾翼的最大应变量为 0.7347mm ，所以此尾翼材料满足所需要的强度要求。具体的应力应变情况如下图所示：

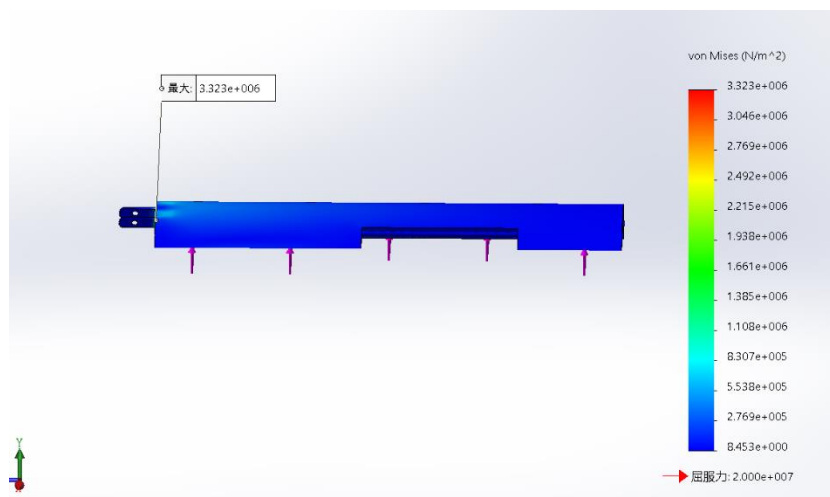


图 4-8 尾翼应力分布图

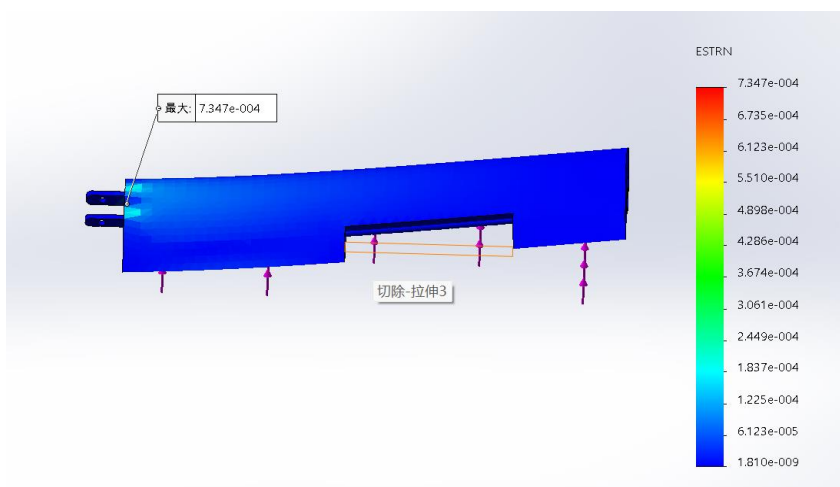


图 4-9 尾翼应变分布图

通过上述的静力学实验分析图，可以得出在尾翼与机身连接处存在最大应力，所以应该考虑加强尾翼与机身的连接处。

4.4 起落架的静力学实验分析

4.4.1 起落架的相关参数和材料选择

由于起落架是支撑无人机的重要的承力部件，所以对模型的起落架进行静力学实验分析。

由于起落架要承受整个无人机的重量，所以需要考虑其强度和刚度要求，在此基础上通过对材料的比较，最后选择了合金钢作为起落架的材料，此材料具体性能参数如下表 4-5 所示：

表 4-5 合金钢的性能参数

属性	数值	单位
弹性模量	2.1e+011	牛顿/m ²
中泊松比	0.28	不适用
质量密度	7700	Kg/m ³
屈服强度	620422000	牛顿/m ²

4.4.2 起落架的应力应变情况分析

为了能够保证起落架的材料性能参数满足承载无人机的总重量，下面对起落架进行了静力学分析。由于无人机起飞最大重量约为 8kg，所以我们在起落架的每个杆上加载一个大小为 50N 的集中载荷。

起落架的网格划分效果如图 4-10 所示。

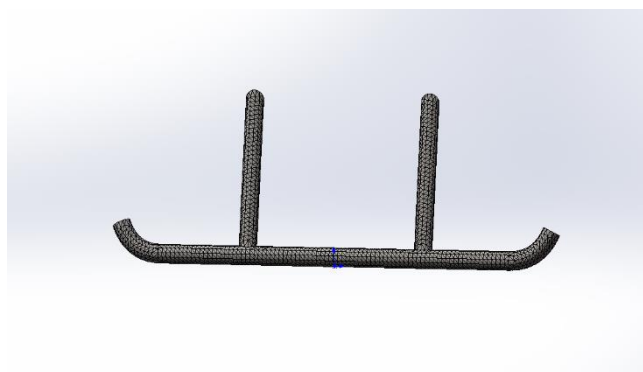


图 4-10 起落架的网格划分效果图

通过静力分析可得，起落架所承受的最大应力为 $3.011 \times 10^7 \text{N/m}^2$ ，远小于材料的屈服强度；与此同时，起落架的最大应变量为 9.731mm，所以此起落架材料满足所需要的强度要求。具体的应力应变情况如下图所示：

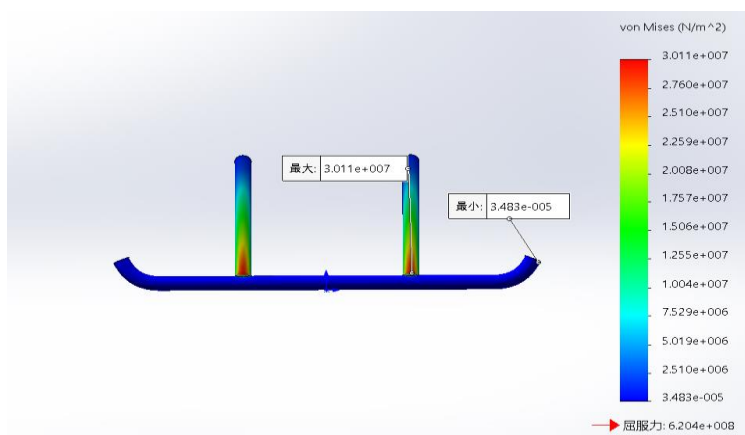


图 4-11 起落架应力分布图

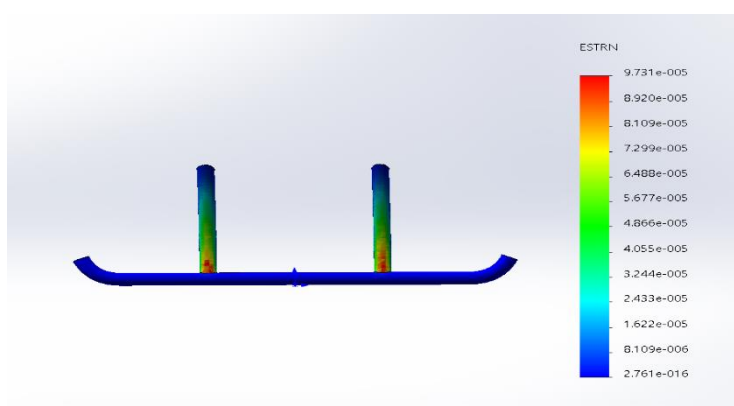


图 4-12 起落架应变分布图

通过上述的静力学实验分析，可以得出在起落架的满足强度和刚度要求，验证了起落架的可靠性。

4.5 机翼的气动分析

机翼的设计中，由于两侧机翼之间开圆孔，会影响气动性，为观察机翼的气动性，将对模型处于平飞情况下的机翼进行气动分析，本分析有实习公司提供实验平台，得出最终分析结果。

现设此无人机的飞行速度为 50m/s，飞行高度为 10m，因分析模型处于平飞状态下的气动情况，所以设攻角为 0，再对机翼进行分析，具体分析情况如下图：



图 4-13 机翼气动分析云图

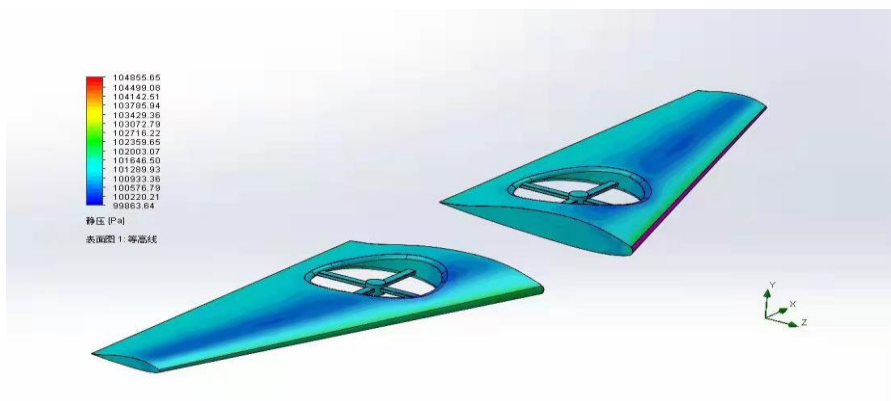


图 4-14 机翼静压分布图

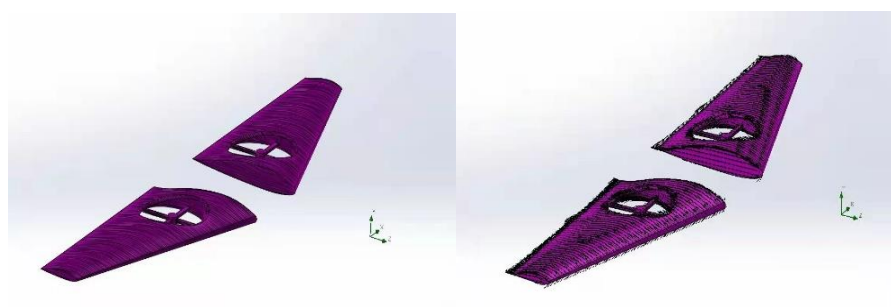


图 4-15 机翼气动分析云图

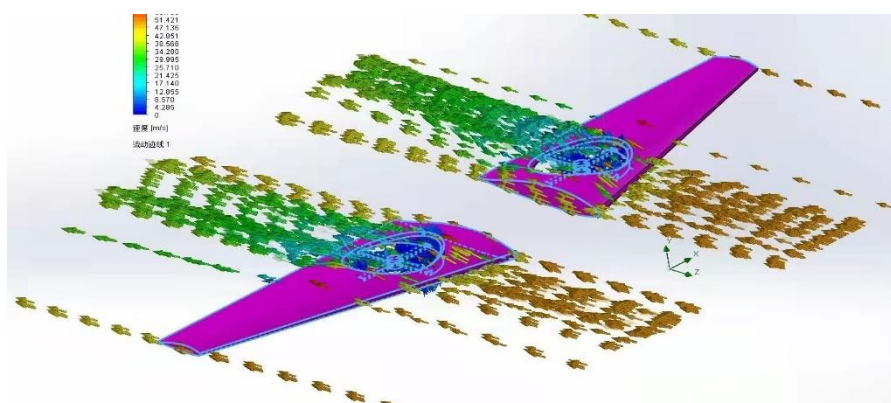


图 4-16 机翼流线图

由以上分析中计算出机翼的升力为 50.166N，阻力为 13.626N，力矩为 23.212N·m，而本设计模型的最大起飞重量为 8kg，由机翼旋翼带动起飞，则能完成正常的平飞飞行。

4.6 本章小结

为了保证机翼的强度和刚度满足要求，对机翼进行了静力学试验分析，讨论其在起飞和平飞的两种情况下的应力应变情况。经过估算，机翼在起飞是受到的集中载荷约 50N，在平飞时受到的集中载荷约 10N 和 40N 的分布载荷。将机翼的翼根位置进行固定并在机翼上加载载荷，最后观察应力应变图可得：机翼危险

点的最大应力远小于材料本身的屈服强度，满足强度要求。机翼在两种飞行状态下最大形变量分别约为 1.238mm 和 1.222mm，可以忽略，可以把机翼近似为刚体进行分析。由于主机翼有圆孔设计，对主机翼的气动性分析中，得到升力为 50.166N，而模型设计中旋翼可辅助飞行，此无人机可以完成正常平飞。

在上机翼的分析中知道在尾翼与机身连接处存在最大应力，所以需要加强上机翼与机身的连接处的强度。而对起落架的分析中可以知道选择的材料和设计满足强度和刚度要求，所以起落架是具备一定的可靠性。

第五章 总结与展望

垂直起降固定翼无人机，兼具旋翼与固定翼的特点，具有良好的飞行性能。经过固定翼与旋翼的结合使得垂直起降固定翼无人机能完成更多且具备挑战性的任务，在近年来人们也越来越向着多种功能与多种任务的垂起固定翼无人机研究与发展。

此设计中的垂直起降固定翼无人机已完成零件设计和布局设计，通过软件完成三维建模，并且完成了无人机的整体装配，也对无人机的结构进行了有限元分析，对机翼、尾翼、起落架进行了静力学实验分析。由于机翼的开孔设计，也对机翼进行了简单的气动分析，从分析中得出此无人机能完成垂直起降和正常平飞的结果。

但是在设计中也存在不足，由于垂起固定翼无人机涉及非常多的计算和验证，包括空气动力学、流体力学等，需要更深的理论计算和实验验证，本文的研究只处于初级的布局设计和建模分析阶段，还有很多需要细化研究和完善的地方，比如：

- (1) 机翼中的开圆孔设计还需要进一步的研究验证；
- (2) 对无人机的飞行系统的研究设计也没有验证和完整化；
- (3) 机翼与尾翼的设计对整体无人机升力的具体影响也未作出明确的验证分析；
- (4) 对各个结构的连接处没有深入的研究。

一个完整的垂起固定翼无人机设计和实验分析是需要更多的时间，也需要考虑到非常多的系统，并且也得对各种飞行状态和飞行环境进行实验分析。对于本设计形态的垂起固定翼无人机会更多的设计困难点，甚至是需要技术专家的指导。在今后，希望还能有机会继续完成后续的研究并创新更多的相关设计。

参考文献

- [9] 王科雷,周洲,马悦文等.垂直起降固定翼无人机技术发展及趋势分析[J/OL].航空工程进展:1-13[2021-11-23].
- [10] 雷志荣,赵超,秦玮等.10kg 尾座式垂直起降固定翼无人机系统[J].航空兵器,2020,27(06):43-48.
- [11] 高洪波,苏周,张兆海.垂直起降固定翼无人机发展趋势分析[J].科技创新导报,2019,16(22):232+237.
- [12] 杨传广,马铁林,甘文彪等.垂直起降固定翼无人机技术特点浅析[C]//2017年(第三届)中国航空科学技术大会论文集(下册),2017:61-66.
- [13] 于进勇,王超.垂直起降无人机技术发展现状与展望[J].飞航导弹,2017(05):37-42.
- [14] 李耐和.美军下一场战争需要的十项关键技术[J].新时代国防,2011(12):1-8.
- [15] Thamm H P, Brieger N, Neitzke K P, et al. SONGBIRD--- An innovative UAS combining the advantages of fixed wing and multi rotor UAS [C]//International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics. Toronto, Canada, 2015, 345-349.
- [16] 张飞.垂直起降固定翼无人机研究[D].南昌航空大学,2019.
- [17] 包荣剑.林用小型垂直起降固定翼无人机的设计研究[D].东北林业大学,2019.
- [18] 王珂,李晓甜.垂起固定翼无人机高速公路无人值守巡检系统应用研究[J].江苏科技信息,2021,38(25):56-58.
- [19] 贺玺睿.垂直起降固定翼电力巡线无人机飞控系统的设计[D].东北农业大学,2020.
- [20] Ma T L, Wang X S, Wei Z H, et al. Conceptual Design of a VTOL Box-Wing UAV with Rotatable Duct-Fans [C]//AIAA Scitech 2019 Forum, 2019.
- [21] Hoeverler B, Wolf C C, Raffel M, et al. Aerodynamic Study on Efficiency Improvement of a Wing Embedded Lifting Fan Remaining Open in Cruise Flight [C]//2018 Applied Aerodynamics Conference, 2018.
- [22] 匡银虎,刘明远,石矿林.四旋翼垂直起降固定翼飞行器设计[J].科技视界,2016(24):36-38.
- [23] 赵长辉,段洪伟,张安平.阿古斯塔项目零新型垂直起降技术验证机[C]//2014(第五届)中国无人机大会论文集.北京:2014:23-27.
- [24] 刘媛媛.垂直起降固定翼无人机设计、控制与试验[D].南京航空航天大学,2018.
- [25] 戴蓓.某无人机起落架改型设计[D].南京航空航天大学,2016.
- [26] 张飞,王云,孙一方等.垂直起降固定翼无人机的翼尖垂尾设计分析[J].航空工程进展,2019,10(05):628-633+663.

致 谢

还记到刚刚迈入大学的第一天，可转眼便是大学毕业时节，距离我们毕业离校的时间也屈指可数，美好的大学生活即将结束。我的毕业设计从开头到结束更是离不开老师、同学、朋友给我热情的帮助，借此我要向这些帮助过我的人，道一声由衷的感谢！

四年大学求学生涯中，有付出也有收获，但是在付出和收获过程中，也是老师、同学以及朋友在其中牵线搭桥，我才能得此收获，我也深感幸运与荣幸，非常的感想学校的每一位老师、同学以及其他的朋友们。在论文即将完成之际，我想要诚挚的感谢一位朴实却不平凡的人，我的导师—姚冀涛老师。无论学生出色与否，我的导师都耐心指引，细心教导。从论文题目的选定到论文写作的指导，经导师悉心的点拨后，总会很快的从混乱思绪中走出，得到另一个可行的解决方法。当然导师帮助也不限于学习和毕设上，我记得一次疫情全市封城，导师也是及时联系，及时的帮助我们。导师的恩泽与教诲我牢记于心，受益匪浅。

在完成毕设的过程中，我刚好也在企业实习，非常感谢公司工程师梁文娟和技术专家邓建老师，在我完成毕设的过程中给予我帮助，给我提供一个实验平台，使我能顺利的完成毕设。

最后，我的论文按时完成，当接过我的毕业证时，我想我的大学生活已经真正的结束了吧！本文也有不足之处，请大家多多指教。