



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

## 本科生毕业设计

基于 SolidWorks 的脚踩式飞行器设计

Design of Foot Stepping Aircraft Based on SolidWorks

姓 名 康彦军

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	副高
题目名称	基于 SolidWorks 的脚踩式飞行器设计			
题目类型	工程设计	题目来源	其他项目	
课题来源、 背景及意义	<p>脚踩式飞行器是单人飞行器其中的一个类型,从最早的水动力飞行滑板到如今的旋翼飞行器和涡轮喷气飞行滑板,国内外出现了各种样式的脚踩式飞行器。如法国人 Franky Zapata 研制的喷气动力悬浮滑板 Flyboard Air, 美国人 Hunter Kowald 研发的脚踩式八轴多旋翼飞行器, 以及中国运载火箭技术研究院研制的单人滑板样式的便携飞行器。</p> <p>脚踩式飞行器在民用方面可以用于高空作业、治安巡逻、勘察测绘、消防救灾、商用表演、有效解决交通堵塞、复杂地形人员搜寻与急救等方面,值得一提的是尤其在抗震救灾中能应对很多极端状况,比如地面道路全部损毁的时能够把第一批救援力量及时投放。在军用领域用于监视、侦察、补给、隐蔽突袭和投送方面的军事需求。</p>			
任务及要求	<p>本课题研究任务是设计一款结构简单, 安全可靠脚踩式飞行器。需要设计飞行器的结构, 并对其中的关键结构进行力学性能分析。</p> <p>(1) 总结国内外文献资料, 查询现有的脚踩式飞行器产品特征。分析机构的总重, 选用合适的动力装置, 确定飞行器结构尺寸。</p> <p>(2) 运用 SolidWorks 软件, 完成飞行器结构的建模。</p> <p>(3) 运用 Simulation 对飞行器关键结构进行力学分析。</p>			
工作条件	安装有 SolidWorks 软件的电脑。			
知识与能力要求	<p>(1) 有较好的飞行器相关机械知识储备以及良好的自学能力;</p> <p>(2) 有熟练使用 SolidWorks 等绘图软件的能力。</p>			
系（教研室）审查意见： 同意				
负责人(签名): _____ 年 月 日				



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：基于 SolidWorks 的脚踩式飞行器设计

学院：\_\_\_\_\_ 航空航天学院

专业：\_\_\_\_\_ 飞行器制造工程

学生姓名：\_\_\_\_\_ 康彦军

学号：\_\_\_\_\_ 20414040101

起止日期：2021 年 12 月 03 日~2022 年 06 月 03 日

指导教师：\_\_\_\_\_ 姚冀涛

任务书下达日期：2021 年 12 月 03 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

脚踩式飞行器是当今单人驾驶飞行器领域的有一个热门研究，从最早的水动力飞行滑板到如今的旋翼飞行器和涡轮喷气飞行滑板，国内外出现了各种样式的脚踩式飞行器。如法国人 Franky Zapata 研制的喷气动力悬浮滑板 Flyboard Air 成功飞越了英吉利海峡，美国人 Hunter Kowald 研发的脚踩式八轴多旋翼飞行器，以及中国运载火箭技术研究院研制国内第一款单人滑板样式的便携飞行器。

随着社会的不断发展，对于飞行器的需求已经不仅仅像火车、汽车一样作为一种单一的交通工具而存在，脚踩式飞行器在民用方面可以用于高空作业、治安巡逻、勘察测绘、消防救灾、商用表演、有效解决交通堵塞、复杂地形人员搜寻与急救等方面，值得一提的是尤其在抗震救灾中能应对很多极端状况，比如地面道路全部损毁的时能够把第一批救援力量及时投放。在军用领域用于监视、侦察、补给、隐蔽突袭和投送方面的军事需求。

目前国内外的脚踩式飞行器主要分为两类，一类是以涡轮喷气发动机作为动力源的飞行器，这类飞行器的缺点是耗能大，续航不足，噪声大，结构复杂，对操控者要求高，保护措施不行，造价高。另一类飞行器是以多个旋翼转动产升的推力作为动力源的飞行器，这类飞行器的缺点是载荷小，抗风能力有限，飞行速度慢。

为了改善脚踩式飞行器的缺点，优化其性能，在研究国内外的脚踩式飞行器的基础上，综合涡轮喷气式和旋翼式两者的优点，本文提出了一款噪声小，结构简单，更加安全的脚踩式飞行器，因此优化飞行器稳定飞行，噪声，复杂结构，对人体的安全保护是该次课题的主要研究目的。

## 2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

本课题主要的研究任务是设计一款噪声小，结构简单，更加安全的脚踩式飞行器。需要通过建模设计出飞行器的结构，并对其进行结构设计的力学性能分析。

### 工作内容

(1) 通对国内外文献资料的翻阅和查找，查询脚踩式飞行器的国内外已有产品的设计方案，结构样式，力学性能。考虑机构的总重，优化设计方案，根据需求计划后续的设计步骤。

(2) 利用 SolidWorks 软件对设计出来的各部件进行三维绘图设计：

运用 SolidWorks 软件，完成机构的建模，并装配形成整体飞行器。

(3) 运用 Simulation 对设计出来的部分部件进行有限元分析：

运用 Simulation 插件对旋翼和机臂进行静力学分析，验证飞行器关键结构的设计强度可靠性。

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) 毕业设计（论文）一套
- (2) SolidWorks 模型一份

4. 推荐参考资料:

- [1] 杨学文,马瑞阳,李志艺.基于 SolidWorks 的小型四旋翼无人机设计及仿真[J].机械工程与自动.2020(02).
- [2] 张文信,黄阳.SolidWorks 环境下飞行器类形体的一种快速建模方法[J].机电产品开发与创新,2017,30(04).
- [3] 唐飞龙,程亚民,王志刚,杨洋.基于 SolidWorks 和 ANSYS 的一种四旋翼飞行器旋翼的设计及分析[J].山东工业技术.2015(14).
- [4] 王颖.旋翼气动性能分析[J].河北农机.2013(05).
- [5] 王颖.单人飞行器充气式旋翼的设计与研究[D].中北大学.2015.
- [6] 谌鑫,杨海诚.基于数字化技术的单人飞行器结构设计及优化研究[J].南方农机 . 2021(05).
- [7] 周依婷.未来城市个人飞行器研究[J].工业设计.2017(11).
- [8] 纪鑫东,蒋维安.一种变体无人机构型仿真研究[J].现代计算机.2021(13).
- [9] Jiangsu Digital Eagle Technology Development Co. Ltd.; Patent Issued for Flying Skateboard (USPTO 10,245,500)[J]. Defense & Aerospace Week,2019.
- [10] AZ Party Zone Launches Flyboarding From Lake Pleasant; For families or corporate events new activity from AZ Party Zone includes instruction.[J]. M2 Presswire,2013.
- [11] Elisa Capello,Alessandro Scola,Giorgio Guglieri,Fulvia Quagliotti. Mini Quadrotor UAV: Design and Experiment[J]. Journal of Aerospace Engineering,2012,25(4).

所在专业审查意见:

负责人: \_\_\_\_\_

年 月 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）课题的目的意义

随着社会的不断发展，飞行器的发展日趋完善。作为单人式飞行器其中的一种，脚踩式飞行器在民用方面可以用于高空作业、治安巡逻、勘察测绘、消防救灾、商用表演、有效解决交通堵塞、复杂地形人员搜寻与急救等方面，值得一提的是尤其在抗震救灾中能应对很多极端状况，比如地面道路全部损毁的时能够把第一批救援力量及时投放。在军用领域用于监视、侦察、补给、隐蔽突袭和投送方面的军事需求。

目前国内外的脚踩式飞行器主要分为两类，一类是以涡轮喷气发动机作为动力源的飞行器，另一类飞行器是以多个旋翼转动产生的推力作为动力源的飞行器。

为了改善脚踩式飞行器的缺点，优化其性能，在研究国内外的脚踩式飞行器的基础上，综合涡轮喷气式和旋翼式两者的优点，本文提出了一款噪声小，结构简单，更加安全的脚踩式飞行器，因此优化飞行器稳定飞行，噪声，复杂结构，对人体的安全保护是该次课题的主要研究目的。

### （二）国内外研究情况及发展趋势

脚踩式飞行器是当今单人驾驶飞行器领域的有一个热门研究，从最早的水动力飞行滑板到如今的旋翼飞行器和涡轮喷气飞行滑板，国内外出现了各种样式的脚踩式飞行器。如法国人 Franky Zapata 研制的喷气动力悬浮器 Flyboard Air，美国人 Hunter Kowald 研发的脚踩式多旋翼飞行器以及中国运载火箭研究院研制的单人滑板样式的飞行器。

#### 1.国外研究现状

2019，法国人 Franky Zapata 驾驶着改进过得喷气动力悬浮滑板 Flyboard Air 成功飞越了英吉利海峡。在 22 英里（约 35 公里）的旅途中，他的速度达到了 106 英里（约 170 公里）每小时。当天，在三架直升机的陪同下，最高速度达 177 公里/小时，离海面高度约为 15-20 米。这款 Flyboard Air 内部配有的“逻辑系统”包含一系列算法，可以帮助飞行保持稳定。飞行者还需要背上一个燃料的背包，为持续飞行提供燃料。

2021 年美国 Hunter Kowald 研发的脚踩式飞行器，在成功完成了多次载人飞行后正式推出市场。他戴着头盔、手拿着控制器、站在一架八轴多旋翼的无人机上飞行，飞行的画面真的就像是在空中滑行一样。他表示我们共同努力使飞行成为出行的未来。这是世界上功能最强大、结构紧凑和效率最高的悬浮滑板飞行器。这款飞行器可以被操控，也可让你安全降落。该飞行滑板可负载最大 450 斤，定制的碳纤结构通过了 1.5 倍的安全系数测试并可负载 680 斤。如果 5 个电源系统中有 1 个丢失，仍能安全着陆。即使有两个电机发生故障，飞行器也可以安全着陆。所有电子元件都具有冗余性，因此设备可以监控并选择最强的信号。

#### 2.国内研究现状

2020年,中国运载火箭技术研究院成功研制出国内第一款单人滑板样式的飞行器,如果这款飞行器可以做到军用化,将会提升我军单兵作战的能力。根据目前消息来看,这款便携式单人飞行器最大载重可以达到160公斤,目前可以达到20公里的航程,飞行高度范围可以达到100-1000米左右,对于这款单人飞行器而言,它的体积小,适合单兵携带,在广袤的战场大环境中非常的隐蔽,在偏僻的边缘地区适合潜入。飞行器飞的较低,受到地球曲率作用的影响,它可以利用目前对空侦测雷达的照射死角来躲避敌军的雷达探测,也就是说,它是有能力做到在雷达面前完全隐身化的。据了解,飞行器的动力由五个微型涡轮喷气发动机提供发动机,具备旋转和矢量摆动功能。飞行滑板控制系统由涡轮控制器、操纵手柄等组成。飞行员可以利用重心进行综合控制。值得一提的是,该飞行器即使遇到突发情况,一台发动机因故障停止运转,飞行器也能安全的降落。

### (三) 课题主要研究内容

该课题利用SolidWorks软件设计出飞行器结构,研究脚踩式飞行器的结构能否实现气动外形飞行条件,使其实现稳定的飞行,保证飞行器的稳定起飞和降落,以保证驾驶人员的安全。结合参考文献查阅脚踩式飞行器的飞行原理,力学结构。之后对其机构进行力学分析,分析其机构在静止状态、运动状态下的力学性能是否能够达到设计要求状态。

本课题主要研究内容如下:1、脚踩式飞行器结构设计;2、旋翼气动分析;3、飞行器关键结构力学分析。

### (四) 参考文献

- [1] 杨学文,马瑞阳,李志艺.基于SolidWorks的小型四旋翼无人机设计及仿真[J].机械工程与自动化.2020(02).
- [2] 张文信,黄阳.SolidWorks环境下飞行器类形体的一种快速建模方法[J].机电产品开发与创新,2017,30(04).
- [3] 唐飞龙,程亚民,王志刚,杨洋.基于SolidWorks和ANSYS的一种四旋翼飞行器旋翼的设计及分析[J].山东工业技术.2015(14).
- [4] 王颖.旋翼气动性能分析[J].河北农机.2013(05).
- [5] 王颖.单人飞行器充气式旋翼的设计与研究[D].中北大学.2015.
- [6] 谌鑫,杨海诚.基于数字化技术的单人飞行器结构设计及优化研究[J].南方农机.2021(05).
- [7] 周依婷.未来城市个人飞行器研究[J].工业设计.2017(11).
- [8] 纪鑫东,蒋维安.一种变体无人机构型仿真研究[J].现代计算机.2021(13).
- [9] Jiangsu Digital Eagle Technology Development Co. Ltd.; Patent Issued for Flying Skateboard (USPTO 10,245,500)[J]. Defense & Aerospace Week,2019.

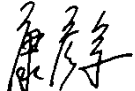
[10] AZ Party Zone Launches Flyboarding From Lake Pleasant; For families or corporate events new activity from AZ Party Zone includes instruction.[J]. M2 Presswire,2013.  
 [11] Elisa Capello,Alessandro Scola,Giorgio Guglieri,Fulvia Quagliotti. Mini Quadrotor UAV: Design and Experiment[J]. Journal of Aerospace Engineering,2012,25(4).

一、 进度及预期结果

起止日期	主要内容	预期结果
2021.10.1—2021.11.25	查找、收集文献，学习相关知识。	掌握飞行器的知识理论，确定设计方向。
2021.11.26—2022.1.1	总结资料文献，对知识归类整理，然后对收集的资料进行详细的分析，熟悉设计任务以及要求，确定设计方案。并完成开题报告。	完成开题报告并确定飞行器结构样式。
2022.1.2—2022.2.28	按照要求与设计方案完成脚踩式飞行器结构建模。	完成结构模型的绘制。
2022.3.1—2022.4.10	完成飞行器结构的装配，对关键结构进行有限元分析，撰写论文初稿。	模型建立完成，论文初稿撰写接近尾声。
2022.4.10—2022.4.30	论文的修改及完善，模型进行优化，准备中期答辩	完成论文的撰写，优化模型，中期答辩。
2022.5.1—2022.6.2	确定论文终稿，完成 PPT，准备最终答辩。	完成论文终稿，答辩 PPT。
2022.6.3	最终答辩	完成答辩。
完成课题的现有条件	(1) 具备良好的绘图能力，对机构的运动有较好的理解； (2) 有较好的自律性和自学能力； (3) 熟练使用 SolidWorks 等绘图软件。	
指导教师意见	指导教师：_____ 年__月__日	
开题答辩小组意见	组 长：_____ 年__月__日	

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

单人式飞行器诞生于二战结束后，距今已有 70 多年的发展历史。限于当时市场需求较小的原因，研发投入少，发展较为缓慢。近些年随着科技进步，军事和民用方面对于单人式飞行器的需求逐渐扩大，单人式飞行器产品的热度又重新燃起。但是单人式飞行器存在操作难度高，安全可靠低，续航时间短、飞行器结构复杂等问题。于是本文通过总结单人式飞行器国内外研究现状，提出一款脚踩式飞行器，飞行器具有八个旋翼，使用锂电池作为供电电源，可以提供足够升力保证载人飞行任务。操作人员需两脚分开站立在飞行器的脚踩固定器中操作飞行器运动。

根据载人飞行器的飞行动力要求，选取合适的电机、旋翼、电池，从而确定飞行器各个零件的尺寸。使用 SolidWorks 2016 软件绘制出脚踩式飞行器的零件并将零件装配为飞行器整体。完成飞行器建模工作之后，运用有限元分析法，对旋翼使用 Flow Simulation 插件和 Simulation 插件进行流固耦合分析；对机臂使用 Simulation 插件进行静力学分析，从而验证飞行器重要零部件模型设计的强度和可靠性。最后，对脚踩式飞行器的设计过程做出总结，并对今后下一步研究提出展望。

本文设计的脚踩式飞行器是单人飞行器中的一种，可以用于载人飞行。无论是军事还是民用都有着巨大的使用需求，如军事侦查，军事物资运输、高空作业、治安巡逻、勘察测绘、消防救灾、商用表演等方面。

**关键词：**单人式飞行器；八旋翼；结构建模；有限元

## ABSTRACT

Today's rotor UAV development prospects are broad, and the scientific and technological level of rotor UAVs is extremely high. With the continuous development of social progress, people's demand for manned aerial vehicles is also increasing, but the development speed of manned aerial vehicles is far less than the development speed of rotary-wing unmanned aerial vehicles, whether it is the limitation of operational difficulty or safety and reliability, or the shortcomings of aircraft technology research and other issues are the reasons for the slow development of manned aerial vehicles. Therefore, this paper summarizes the research status of single-person aircraft at home and abroad, and proposes a foot-stepped aircraft, which has eight rotors and uses lithium batteries as a power supply to provide sufficient lift to ensure manned flight. The operator needs to stand with two feet apart in the foot fixer of the aircraft to operate the aircraft movement.

According to the flight power requirements of the manned aircraft, the appropriate motor, rotor and battery are selected to determine the size of each part of the aircraft. Use SolidWorks 2016 software to draw parts of the foot-stepped aircraft and assemble the parts as a whole. After completing the modeling work of the aircraft, the finite element analysis method was used to analyze the fluid-structure interaction of the rotor using the Flow Simulation plug-in and the Simulation plug-in. Static analysis of the arm using the Simulation plug-in verifies the strength and reliability of the model design of important aircraft components. Finally, we summarize the research process of this project and put forward prospects for further research in the future.

The foot-stepped aircraft is one of the single-person aircraft and can be used for manned flight. Both military and civilian have great prospects for use, such as military reconnaissance, military material transportation, high-altitude operations, security patrols, surveying and mapping, fire and disaster relief, commercial performances and so on.

**Key words:** Single-man aircraft; octagon; structural modeling; finite element

# 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.2.1 国外研究现状.....	1
1.2.2 国内研究现状.....	2
1.3 研究意义和目的.....	3
1.4 研究内容与结构安排.....	3
第二章 脚踩式飞行器的总体设计方案.....	4
2.1 脚踩式飞行器的机械结构与飞行原理.....	4
2.1.1 飞行器的机械结构.....	4
2.1.2 飞行器的飞行原理.....	5
2.2 脚踩式飞行器重量分析与动力系统选用.....	6
2.2.1 重量分析.....	6
2.2.2 动力系统选用.....	7
第三章 脚踩式飞行器的结构建模.....	11
3.1 零部件尺寸的确定.....	11
3.2 脚踩式飞行器主要零部件建模.....	11
第四章 脚踩式飞行器关键结构分析.....	17
4.1 有限元法的基本概念及分析步骤.....	17
4.2 旋翼流固耦合分析.....	17
4.3 机臂静力学分析.....	19
第五章 总结与展望.....	21
5.1 总结.....	21
5.2 展望.....	21
参考文献.....	22
致 谢.....	23

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景

单人式飞行器是由个人自主控制，可以飞离地面、在空间自由飞行的个人飞行装置。以其轻巧，灵活，方便，可低空飞行的独特优点来看，个人飞行器有着广阔的应用场景。近些年，随着科技进步发展，人类对飞行的渴望逐步变为现实；加之出行方式的多样化，陆地交通拥堵情况越来越严重，市场上对于可以代替陆地出行的单人飞行器产品存在巨大的需求。单人飞行器历史悠久，第二次世界大战结束后，美方军队汲取战争经验教训，为应对日后难度较高的特殊军事任务，首先研制出 De Lackner DH-4 单人旋翼飞行器，其最快飞行速度为 120km/h，但存在诸多缺点：体积庞大，稳定性不高，容易侧翻；后又研制出 Hillel VZ-1 飞行器和 VZ-6 飞行器，前者配备有大尺寸的螺旋桨使其具有较强的安全性和实用性，后者飞行器控制者具有较大的操作空间。但当时由于技术水平的落后，此类飞行器整体结构复杂、体积较大、平稳性差。之后的几十年，相继出现了很多旋翼式载人飞行器，逐步的改进包括旋翼的尺寸与材料的选用、机身体积的缩减和重量的减轻等，以及设计思路的转变，并且有很多都投入了量产。2020 年美国，一款长 1.75m 宽 2.64m 高 2.3m 的单人飞行器问世，其最大起飞重量 325kg，最大飞行速度 128km/h，悬停高度 2000m 以上，被命名为“独行者”单人飞行器，相比以前的设计样式有较大改进，充分考虑了人机工程学，飞行器的整体设计更为人性化，安全性能更高，并且“独行者”单人飞行器没有电子操作系统，机械操作便于控制。2006 年，日本 GEN 公司的单人操控的 H-4 双桨叶直升飞机研制成功，直升机造型简单且不需要尾翼，它的两片螺旋桨通过微处理器来精密控制，确保共轴反转从而实现升空和转向。飞行器高 2.4m，桨叶直径 4m，最大飞行速度 90km/h，极限飞行高度 1000m、起飞最大重量 160kg；采用四缸 125ml 汽油发动机，可极限飞行时间 30 分钟。具有噪声小、操作控制简单、性能可靠、符合人体工程学要求等优点<sup>[1]</sup>。在众多样式的单人飞行器中，本文主要研究的是脚踩式飞行器。目前国内外的脚踩式飞行器主要分为两类，一类是以涡轮喷气发动机作为动力源的飞行器，这类飞行器的缺点是耗能大，续航不足，噪声大，结构复杂，对操控者要求高，保护措施较差，造价高。另一类飞行器是以多个旋翼转动产生的推力作为动力源的飞行器，这类飞行器的缺点是载荷小，抗风能力有限，飞行速度慢。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国外研究现状

2019 年夏季清晨，法国人 Franky Zapata 驾驶改进后的喷气动力悬浮滑板 Flyboard Air 顺利飞越了英吉利海峡<sup>[2]</sup>。不到半小时，由法国桑加特安全抵达了英国多佛，在 22 英

里的飞行途中，喷气动力悬浮滑板的平均飞行速度每小时 106 英里。当日，在三架直升机的护航试验下，其最高速度达到每小时 177 公里，离海面最高约 20 米。这款喷气动力悬浮滑板 Flyboard Air 内部装有被称为“逻辑系统”的一系列算法，可以帮助飞行器保持平稳。操控人员需背上一个装满煤油和充气燃料的背包，可为飞行器不断提供燃料。

2021 年美国人 Hunter Kowald 研发的脚踩式飞行器，在顺利完成多次载人飞行试验后，正式引入市场。Hunter Kowald 戴着保护头盔、手握遥控器、站在多旋翼飞行器上飞行，飞行时的画面像是驾驶员在空中滑行一样。他宣称让飞行成为普通的交通方式是自己努力的目标。这款飞行器功能强大、结构紧凑、飞行效率高。该飞行器最大载重 225kg，定制的碳纤结构通过了 1.5 倍的安全系数测试，并且最大可负载 340kg。如果 5 个电源系统中有 1 个失效，仍能安全降落。如果有 2 个电机失能，飞行器也可以平安着陆。所有电控设备都具有冗余性<sup>[3]</sup>，因此设备可以监控并选择最强的信号。

### 1.2.2 国内研究现状

2020 年 11 月 10 日，中国运载火箭技术研究院宣布成功研制出国内第一款滑板样式的载人飞行器（如图 1-1），飞行器结构小巧，可以承载一人，如果这款飞行器可以装备到部队，可以极大地提升军队单兵作战的能力。据目前官方消息称，这款便携式单人飞行器最大可以承载 160 千克，飞行距离可达 20 公里，最高飞行高度 1000 米左右。这款单人飞行器体态娇小，非常适合单兵携带，在广阔的战场中具有很好的隐蔽性，在偏僻的边缘地区非常适合潜入侦察。飞行器可低空飞行，受到地球曲率的影响，它可以利用目前对空侦测雷达的照射死角来躲避敌方的雷达探测。换句话说，想要完全做到雷达隐身，只需合理的飞行路线规划配合上低空飞行是完全可以达到的。据了解，飞行器的动力由五个微型涡轮喷气发动机提供，具备旋转和矢量摆动功能。飞行器控制系统由遥控器、涡轮控制器等结构组成。飞行员站立在飞行器平板上，可以利用重心进行飞行平衡控制。值得一提的是，该飞行器即使遇到糟糕情况，有一台发动机失效停止运转，剩下的四台喷气发动机也能保证士兵安全正常的飞行<sup>[4]</sup>。

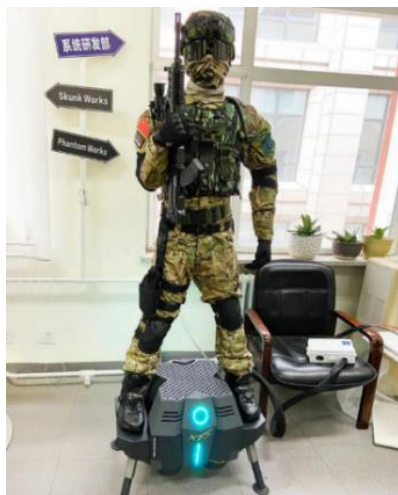


图 1-1 军用单人滑板式飞行器

### 1.3 研究意义和目的

脚踩式飞行器在民用方面可以应用于：高空危险作业、治安保卫巡逻、地形地势的勘察测绘、森林和城市的消防救灾、商用舞美科技表演、野生动植物非破坏性观察保护、有效解决交通堵塞、复杂地形人员的搜救等方面，值得一提的是尤其在抗震救灾中能应对很多极端状况，比如地面道路全部损毁的时能够把第一批救援力量及时投放。在军用领域应用于：军事盲区的监视、敌情侦察、军队后勤补给、隐蔽突袭和特定军事目标的定点针对性清除等方面。

经过对已有飞行器产品设计的全面分析，优化其设计思路，对比涡轮喷气式和旋翼式飞行器两者的优缺点，为提高性能，减轻重量，本文提出一款飞行器为八旋翼脚踩式单人飞行器，采用电池作为动力源，电机作为动力提供装置，旋翼作为升力产生装置。本文的研究目的是设计一款结构简单，飞行稳定，噪声较小，重视对人体安全保护，具有冗余飞行结构的脚踩式飞行器。

### 1.4 研究内容与结构安排

本文主要围绕脚踩式飞行器结构设计进行如下研究：

#### 1、脚踩式飞行器研究前期准备工作

与老师商讨确定论文选题，通过对国内外文献资料的翻阅和查找，记录总结单人式飞行器的设计思路，产品结构，熟悉已有产品设计的优缺点，针对其可以优化改进的空间，提出本文研究的创新点，制定研究计划，以便于后续研究的开展。

#### 2、脚踩式飞行器的总体设计方案

通过研究多旋翼飞行器的旋翼布置原理和设计要求，确定飞行器的旋翼布置方案，根据需实现的飞行器载重需求，选定动力源类型，动力装置，结合人机工程学，确定飞行器主要机构的尺寸类型。

#### 3、脚踩式飞行器的结构与建模

学习掌握 SolidWorks 软件功能的使用操作方式，主要包括对飞行器机身结构、旋翼装置、动力源装置、起落架以及固定夹具和螺栓零件的结构建模设计，将零件进行装配得到脚踩式飞行器的三维模型装配图。

#### 4、脚踩式飞行器结构分析

基于 SolidWorks 软件中的 SIMULATION 插件对脚踩式飞行器的关键结构进行静力学分析，验证飞行器旋翼、机臂的强度可靠性。

#### 5、总结与展望

简要总结本课题的理论分析过程，结构设计建模工作以及其创新点，并对一些尚未完善的工作提出后续的改进方向。

## 第二章 脚踩式飞行器的总体设计方案

### 2.1 脚踩式飞行器的机械结构与飞行原理

旋翼飞行器分为单旋翼和多旋翼两类飞行器。八旋翼飞行器是多旋翼飞行器其中一种。虽然单旋翼飞行器与八旋翼飞行器都属于旋翼机，可是在旋翼结构布置上两者完全不同。旋翼飞行器上的桨叶在运动过程中都会由于桨叶螺距的存在而产生一个扭矩，且这个扭矩与旋翼转向相反，对于单旋翼的飞行器而言，只能依靠尾桨转动产生一个与反扭矩大小相同、方向相反的力来相抵消。为保证飞行器平稳的飞行姿态，就需要复杂多次地改变桨距，这样会降低桨叶的工作效率；而像八旋翼飞行器这样的多旋翼飞行器就没有如此复杂，它不需要通过桨叶桨距的变化来调节飞行器的姿态，多旋翼飞行器普遍采用偶数个旋翼，并且相对的旋翼组成一组，通过正反桨在不同转速的情况下能相互自动抵消桨叶产生的反扭矩<sup>[5]</sup>。这样的飞行器旋翼布置方案相对单旋翼飞行器结构简单了很多。并且由于八旋翼的设计，相较于四旋翼飞行器，具有冗余设计，从而还可以提高系统的安全可靠性。更加注重对于人体安全的保护。本文设计的八旋翼飞行器结构如图 2-1 所示。

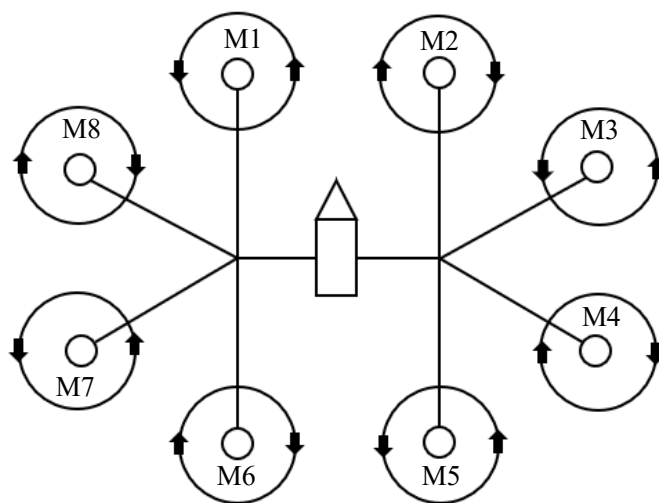


图 2-1 八旋翼飞行器结构

#### 2.1.1 飞行器的机械结构

八旋翼飞行器分为以下三部分：

(1) 机身：机身作为整个飞行器系统的承载结构，由中心载重连接管、机架力臂、起落架三个部分构成。中心管用于安装飞行控制系统、连接所需的外部设备；机架力臂的作用是固定电机座与电机，使八个旋翼水平合理分布；起落架的作用是飞行器在地面停放时支撑脚踩式飞行器整机，避免螺旋桨与地面接触，减弱起飞地面效应以及吸收脚踩式飞

飞行器着陆时产生的撞击力。机身在整个飞行过程中承受人体载荷产生的重力、旋翼旋转产生的推力、飞行器自身重力等载荷，以及无刷电机的振动影响、外界风阻等，并且还要承受飞行器在降落过程中来自起落架的冲击载荷。因此，机身结构必须具备一定的强度、刚度以及稳定性。这是脚踩式飞行器载人飞行时人身安全的重要保证。

(2) 动力装置：八旋翼飞行器的动力系统主要由电机、桨叶、电调及电池组等构成。旋翼通过螺栓固定在电机上，机臂末端连接电机座，电机座上安装电机，电调连接在电机和电池之间，电池组位于机身中部中心载重连接管下端。飞行器动力装置类型分为拉力型动力装置和推力型动力装置（如图 2-2 所示），他们的区别在于旋翼与机臂的相对高度位置。无刷电机与旋翼安装在机臂上端时，是拉力型动力装置，旋翼转动产生拉力；无刷电机与旋翼安装于机臂下端时，是推力型动力装置，旋翼转动产生推力。本次设计考虑到人体安全问题，为了让旋翼与人体存在一定高度差，旋翼的位置设计在机臂下方，因此本次研究选用推力型动力装置。



图 2-2 两种动力型装置飞行器

(3) 飞行控制系统：飞行控制系统是旋翼飞行器的核心，是飞行器的指挥中心，其中飞行控制系统包括全球卫星定位系统（GPS）、惯性测量单元（IMU）、微型计算机、空速传感器、高度传感器、角速率传感器等，主要用于精确采集飞行时飞行姿态及飞行器位置信息，并识别遥控器发出的指令通过算法计算控制量输出给电调，控制每个电机的转速变化达到目标飞行状态，保持飞行稳定性<sup>[6]</sup>。由于本次设计主要目的是实现结构设计，所以飞行控制系统没有在建模过程中体现。

### 2.1.2 飞行器的飞行原理

八旋翼飞行器具有沿 X、Y、Z 轴三个方向的移动及绕 X、Y、Z 轴三个方向的转动，可分别沿某一方向进行平移或旋转，但八旋翼飞行器的输入控制量只有升降、俯仰、横滚、偏航四个控制量。八旋翼飞行器的一切姿态变化均通过改变八个电机的转速来实现。本文采用八旋翼飞行器对其运动原理进行解释，以机头方向为 X 轴正方向建立参考坐标系，X 轴为飞行器水平前进、后退运动方向，Y 轴为飞行器水平左移、右移运动方向，Z 轴为飞行器垂直上升、下降运动方向。八旋翼飞行器在飞行时的姿态变化分为：升降运动、前后移动、左右移动、偏航转动，出于保证驾驶人员安全的问题，在此不对偏航运动做研究。八种飞行姿态都是由主芯片发出电信号控制八个电机，使八个电机转速改变，从而产生不

同的扭矩力差或者作用力差<sup>[7]</sup>。电机转速与八旋翼飞行器的姿态对应关系（“+”表示电机转速增大，“-”表示电机转速减小）如表 2-1 所示。

表 2-1 八旋翼飞行器姿态与电机对应关系

动作	电机 1	电机 2	电机 3	电机 4	电机 5	电机 6	电机 7	电机 8
悬停	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
上升	M1+	M2+	M3+	M4+	M5+	M6+	M7+	M8+
下降	M1-	M2-	M3-	M4-	M5-	M6-	M7-	M8-
前移	M1+	M2+	M3	M4	M5-	M6-	M7	M8
后移	M1-	M2-	M3	M4	M5+	M6+	M7	M8
左移	M1	M2	M3-	M4-	M5	M6	M7+	M8+
右移	M1	M2	M3+	M4+	M5	M6	M7-	M8-

## 2.2 脚踩式飞行器重量分析与动力系统选用

### 2.2.1 重量分析

脚踩式飞行器由一个机身、八组动力单元、多组锂电池、一套飞行控制系统等设备组成。一组“动力单元”包括旋翼、电机以及电调各一个，锂电池组可同时为多组动力单元提供电能。设有效载荷 $G_u$ 是 75kg 主要为一个成年人的平均体重、八组锂电池总质量 $G_b$ 为 45kg、机体结构 $G_s$ 和飞行控制设备 $G_c$ 总质量 30kg<sup>[8]</sup>，质量分布如图 2-3 所示。排除 8 组动力单元的自身质量外，动力单元组在飞行器悬停状态下需保证提供的总推力 $T_t$ 为 1500N，当总推力大于总质量时，飞行器可以垂直上升或姿态调整。 $n$  组动力单元产生的总推力 $T_t$ （除去自重）表示为

$$T_t = n \times (T - G_{unit}g) \quad (2.1)$$

$$n \times (T - G_{unit}g) \gg (G_s + G_c + G_{tl})g \quad (2.2)$$

公式(2.1)、公式(2.2)中： $T$ 为一组动力单元产生的推力； $G_{unit}$ 为一组动力单元的重量。

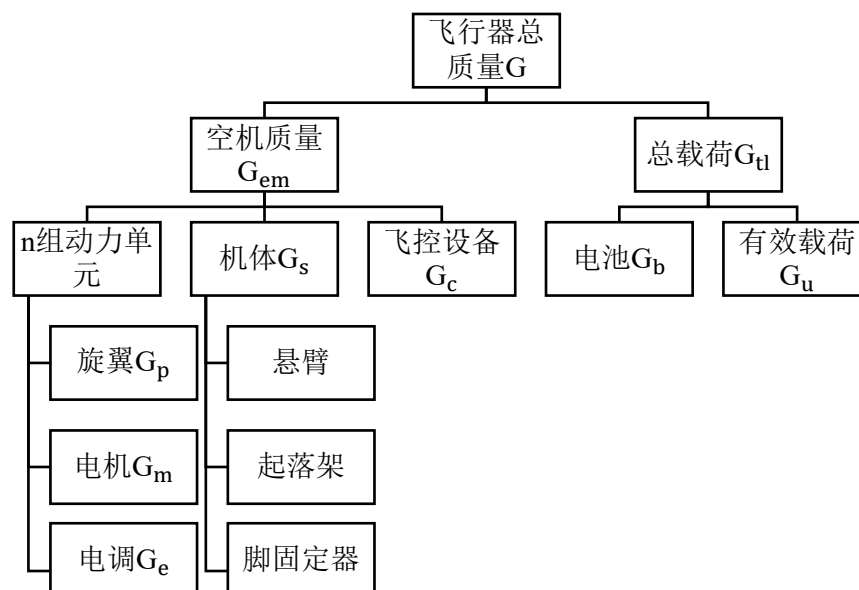


图 2-3 多旋翼飞行器质量分布

## 2.2.2 动力系统选用

动力系统是八旋翼脚踩式飞行器的核心，是决定飞行器性能好坏的关键因素。目前，多旋翼飞行器普遍使用无刷电机进行驱动。无刷电机与有刷电机相比较来看，几何结构更小、重量也更轻，采用永磁转子，无磁芯损耗、效率更高，可避免由碳刷换向产生的电火花干扰、碳刷磨损，更适合远距遥控且使用寿命长、振动小、维修方便<sup>[9]</sup>。

高效的动力系统部件是保证八旋翼飞行器飞行性能的关键。动力余度过大必然造成动力浪费，且会增加机身自重，降低飞行效率；动力不足必然导致八旋翼飞行器不能完成规定任务，且会增加电机额外功率，电机长时间大功率运行会大大增加电机烧毁的风险，导致坠机等危险事件的发生。确定动力系统部件的关键在于设计时正确估算该飞行器最大起飞重量，根据最大起飞重量确定单个电机所需拉力范围。根据计算结果选择性能最优、最符合设计要求的动力系统搭配方案。

电机与旋翼的选用：脚踩式飞行器的自身重量（含电池）为  $W_a$ ，有效载荷为  $W_b$ ，最大起飞重量为  $W_m$ ，电机数量为  $N_{motor}$ ，悬停状态下一个电机的最大推力为  $L_a$ ，一个电机所需提供的最大推力为  $L_m$ ，他们之间的相互关系如公式(2.3)、公式(2.4)、公式(2.5)：

$$W_m = W_a + W_b \quad (2.3)$$

$$L_a = \frac{W_m}{N_{motor}} \quad (2.4)$$

$$L_m = \alpha L_a \quad (2.5)$$

理论上，当八旋翼飞行器总拉力等于最大起飞重量时，八旋翼飞行器恰好可以悬停。但螺旋桨产生的推力除了把飞行器推起来之外，还要提供一部分动力进行俯仰、横滚及偏航等动作，以及足够富余的动力保证抗风能力。式(2.5)中  $\alpha$  为安全因子，本文中安全因子  $\alpha$  取值为 1.6<sup>[10]</sup>，飞行器自身质量（含电池）预计 75kg，按设计要求有效负载质量为 75kg，

由公式(2.3)可知,脚踩式飞行器起飞重量 $W_m=150\text{kg}$ 。安全因子 $\alpha=1.6$ ,电机个数 $N_{\text{motor}}=8$ ,由公式(2.4)可知,理想状态下当飞行器满载悬停时,单个电机所提供的拉力为:

$$L_a = \frac{W_m}{N_{\text{motor}}} = 18.75\text{kg} \quad (2.6)$$

考虑实际动力冗余情况,此时单个电机所能达到的最大拉力为:

$$L_m = \alpha L_a = 30\text{kg} \quad (2.7)$$

由上述结果可知,脚踩式飞行器要搭载任务载荷实现稳定飞行,需要单个电机能达到最大拉力为 18.75kg。查阅资料得知,鹰动力 Eagle power EA120 电机(如图 2-4 所示)搭配 UC4013L(40 英寸碳纤维直桨)(如图 2-5 所示)最大拉力可达 31.08kg,可满足实际飞行需求。表 2-2 为电机搭配旋翼的性能参数。

表 2-2 鹰动力 Eagle power EA120 电机搭配 UC4013L(40 英寸碳纤维直桨)性能参数

锂电池	电流(A)	推力(g)	转速/PRM	功率(W)
12S	9.98	6030	1545	443.112
	18.85	9050	1885	836.94
	27.85	12040	2147	1236.54
	39.65	15030	2394	1760.46
	53.55	18060	2614	2377.62
	66.75	21050	2792	2963.7
	82.36	24100	2957	3656.784
	99.88	27160	3100	4434.672
	123.64	31080	3290	5489.616



图 2-4 鹰动力 Eagle power EA120 电机



图 2-5 UC4013L (40 英寸碳纤维直桨)

电池选用：电池容量的选择对续航时间及飞行性能都有较大影响，如果电池容量过小便会导致飞行器续航时间缩短，导致飞行器留空时间大大降低，不能满足任务需求；如果电池容量过大，则会增加飞行器自身重量，使得飞行器飞行效率降低。旋翼飞行器处于不同飞行状态时能耗有所差异，很难准确估算总的耗电量。考虑到旋翼飞行器大多处于悬停状态作业，因此采用悬停时电机功率对电池电流、容量进行估算，如下式(2.8)。

$$G_b = kN_{\text{motor}}I_h H \quad (2.8)$$

式中：

$I_h(\text{mA})$ 为飞行器悬停时单个电机电流；

$C_b(\text{mAh})$ 为电池容量；

$k$ 为安全系数，通常取值 1.5；

$H(\text{h})$ 为需求续航时间。

由公式(2.6)计算可得，满载悬停状态下单个电机推力为 18.75kg。由表 2-2 可知，此时电机电流约为 56600mA，满载设计飞行时间 0.25h，由公式(2.8)可得满载电池容量 $C_b$ 为：

$$C_b = 1.5 \times 8 \times 56600 \times 0.25 = 169800 \text{mAh} \quad (2.9)$$

因此，选择 ACE 格氏 22000mAh 12S 雨燕锂电池（如图 2-6 所示）作为动力能源，电池尺寸 100×142×258.5mm，重量 5750g，采用 8 块该电池并联使用，电池电压 45.6V、电池容量 176000mAh，满足满载悬停下电流、容量的需求。



图 2-6 ACE 格氏 22000mAh 12S 雨燕锂电池

## 第三章 脚踩式飞行器的结构建模

### 3.1 零部件尺寸的确定

1、旋翼、电机的结构尺寸确定：首先确定飞行器载重上限，根据已有研究结果估算飞行器各部件质量，相加得出整机重量，从而选用出合适的电机与配套旋翼的尺寸，便可以开展飞行器电机、旋翼的结构设计工作。

2、电源系统的结构尺寸确定：依据飞行时长和给定推力下电机的电流数据，通过公式计算电池容量，选取合适的电池型号，最终得到电池的数量与尺寸，便可以开展飞行器电池、电池盒的结构设计工作。

3、机身的结构尺寸确定：机身包含中心管、机臂、起落架等部分。机臂、中心管的长度设计要求，需要考虑两两旋翼之间互不干涉的原则得出其尺寸，起落架的高度尺寸要求为安装起落架后旋翼不能触地，脚踩固定器尺寸设计需要满足人机工程学，并且方便穿戴。电机座、五通管、端盖、螺栓、U型管夹均以配合上述主要零件为第一原则进行尺寸设计。

### 3.2 脚踩式飞行器主要零部件建模

#### 电机

电机（如图 3-1 所示）的作用是将电能转化为旋翼转动的机械能，电机分为有刷电机和无刷电机。旋翼飞行器使用的一般以无刷电机为主。电机的底部固定在机架力臂的电机座上，另一端用于固定旋翼。选用的鹰动力 Eagle power EA120 电机直径为 110mm，高 58mm，电机上端面有 4 个直径为 4mm 的螺纹孔，用于固定旋翼。

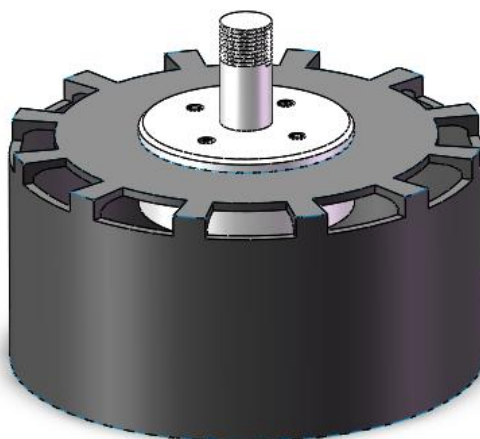


图 3-1 电机

#### 旋翼

旋翼（如图 3-2 所示）的作用为通过旋翼旋转产生升力，驱动飞行器飞行，通过控制

旋翼转速使飞行器做出各种飞行姿态。旋翼通过螺栓连接固定在电机上。UC4013L（40 英寸碳纤维直桨）旋翼长 1016mm，最大宽度 98mm。

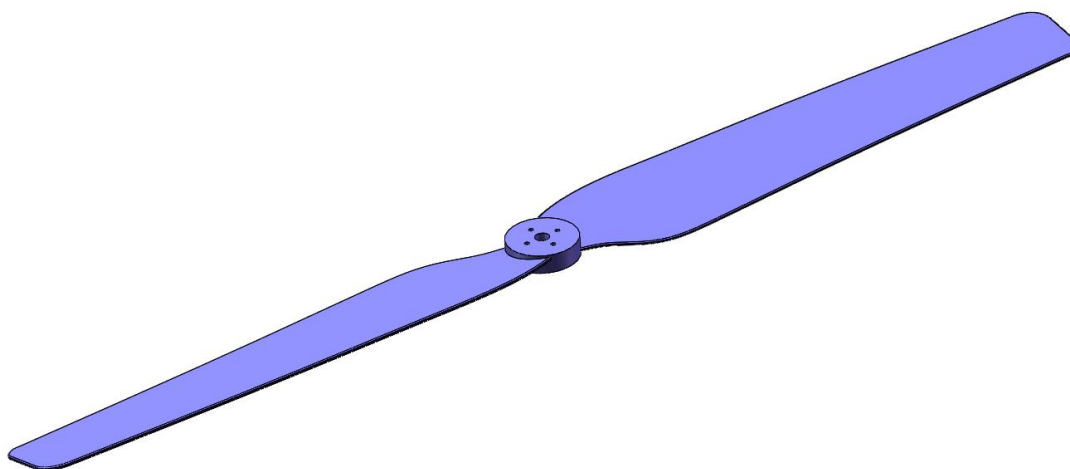


图 3-2 旋翼

电源系统：

电源系统（如图 3-3 所示）主要为电机提供电能，驱动旋翼转动。电池盒由四个 U 型管夹固定在中心管的正下方，八组电池装在电池盒中，电池盒下方连接起落架。因为一块 ACE 格氏 22000mAh 12S 雨燕锂电池尺寸为 100×142×258.5mm；所以电池盒长 826mm，宽 270mm，高 155mm。

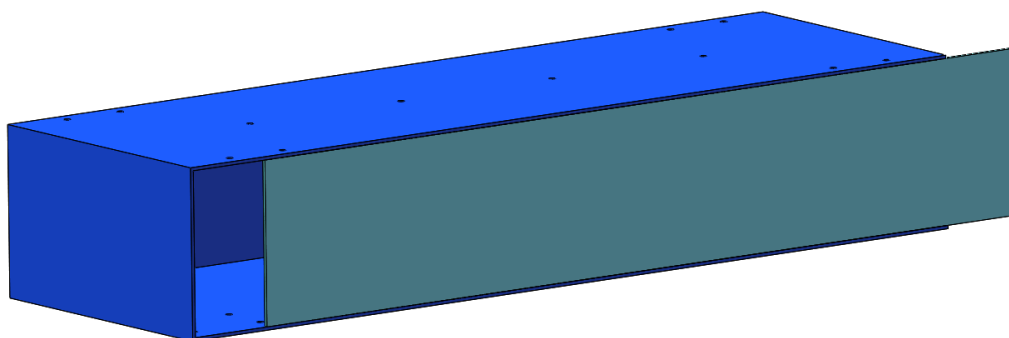


图 3-3 电源系统

中心管建模：

中心管（如图 3-4 所示）是脚踩式飞行器机身结构中最重要的一部分，连接机臂，通过机臂承受旋翼的推力载荷；用于固定电池，挂载飞控设备等，承受人体载荷。因此，中心管是脚踩式飞行器机身结构的基础，也是飞行器的主受力结构。根据以上中心管的性能特点和要求，中心管长为 926mm、直径为 70mm、厚度为 5mm，用螺纹与五通管连接。



图 3-4 中心管

机架力臂建模:

机臂（如图 3-5 所示）的一端是用来固定电机的位置，另一端用来连接机体中心管，可以将旋翼产生的推力传递给接中心管。其结构是一个空心结构，作用是为了减轻重量，并且可以在内部便于电路的铺设。机臂的长度设计取决于旋翼尺寸，要保证相邻旋翼之间互不干涉，防止影响飞行。机臂长 998mm，直径 48mm，厚度为 4mm。与五通管用螺纹连接，电机座套在机臂另一端用螺栓固定，并且留有直径 35mm 的圆型敞口，方便线路排布。



图 3-5 机臂

起落架:

起落架（如图 3-6 所示）用于停放时支撑整个飞行器和人体重量产生的载荷，承受降落着陆瞬间的冲击载荷，使机身、旋翼与地面之间存在一个安全距离。起落架主要由 2 根横梁、2 根滑管、4 个斜支柱组成<sup>[1]</sup>。起落架整体高 319mm，横梁长 644mm，滑管长 1m，两个斜支柱成 60° 排列。

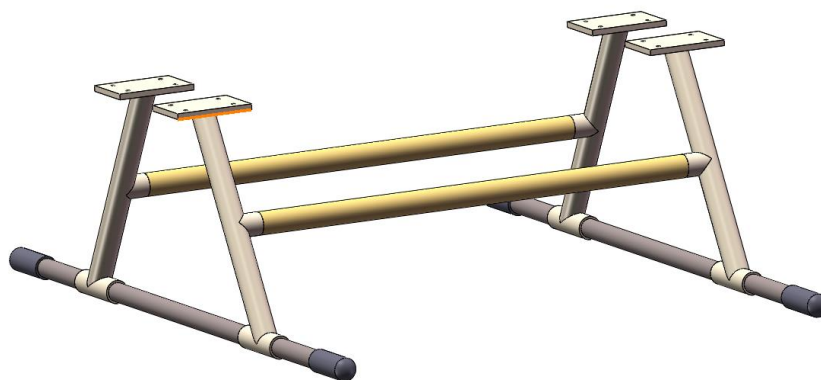


图 3-6 起落架

### 五通管建模:

五通管（如图 3-7 所示）作用是连接机臂与中心管，使四个旋翼水平均匀分布，保证飞行器的气动性能，连接机臂的四个管口以  $60^\circ$  水平排列，管口直径 48mm；连接中心管管口直径 70mm，整体壁厚 4mm。

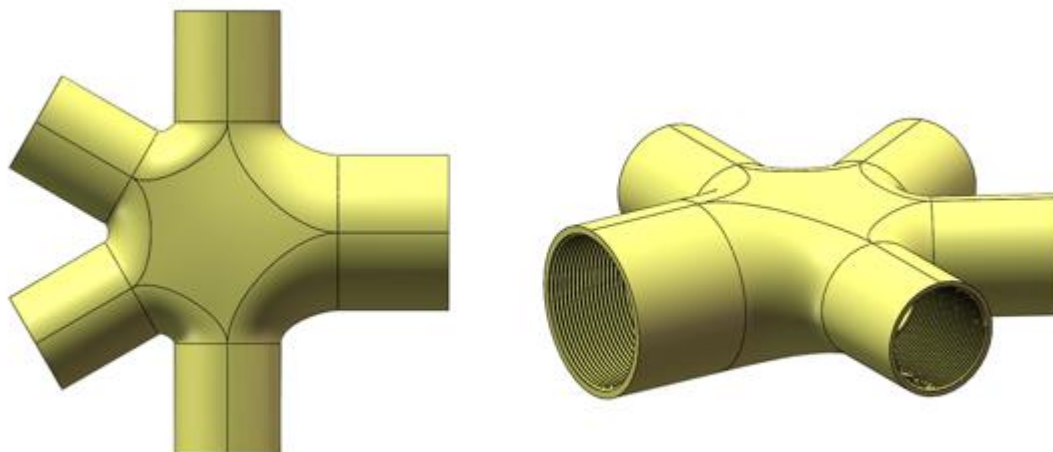


图 3-7 五通管

### 电机座:

电机座（如图 3-8 所示）的作用是将飞行器的无刷电机固定在机架力臂上，一端通过螺栓连接用来固定电机，一端通过螺纹连接和螺栓定位连接在机架力臂上。电机座整体高 77mm，固定电机的端面直径 80mm，厚度 5mm，连接机臂的管口直径 54mm，厚度 3mm。

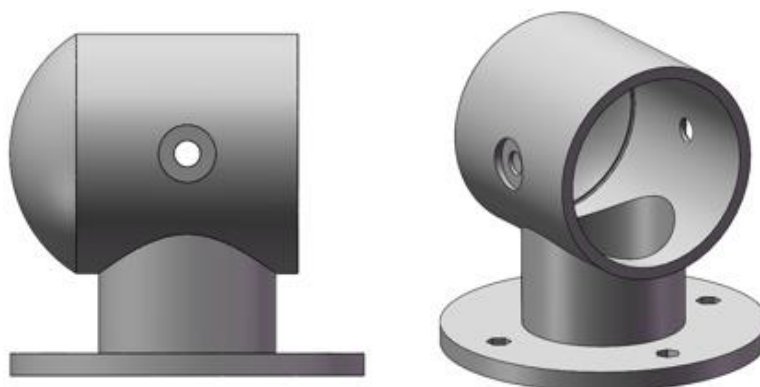


图 3-8 电机座

### 旋翼顶部端盖:

端盖（如图 3-9 所示）通过螺纹连接在电机轴的顶部，用来固定旋翼。螺纹端口内径 12mm，高 25mm。

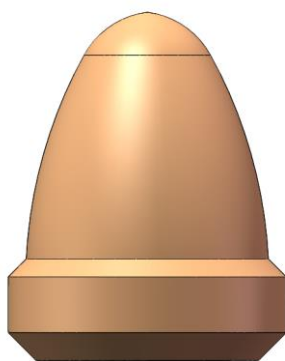


图 3-9 端盖

### 脚踩固定器

脚踩固定器（如图 3-10 所示）用于固定操作人员的站立位置，将人体重心固定在飞行器正中心，保证飞行器平衡。固定器通过螺栓、固定块、管夹同中心管和电池盒连接在中心管上方，构成整体。固定器整体长 328mm，宽 138mm。两固定器相距 660mm。

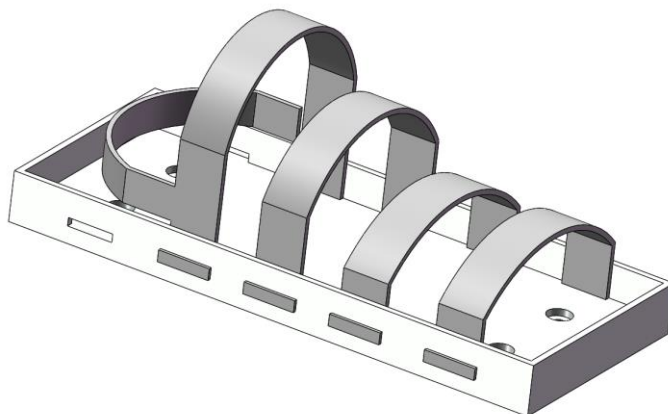


图 3-10 脚踩固定器

### 其他装配零部件

装配零部件（如图 3-11 所示）主要用于飞行器结构的装配与连接，螺栓用于两个带有通孔零件的紧固连接，需要与螺母或者零件上的螺纹配合。U 形管夹用于脚踩固定器和电池盒的固定。

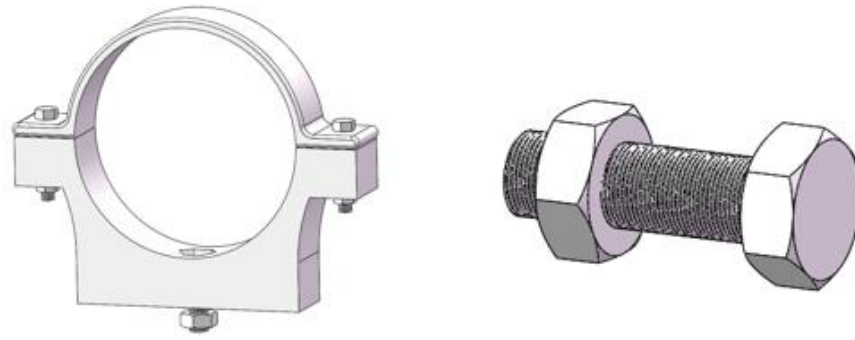


图 3-11 其他装配零部件

使用 SolidWorks 2016 软件将零件组合为飞行器装配体，共计 291 个零件参与装配，脚踩式飞行器长 3315mm，宽 3065mm，高 700mm，脚踩式飞行器总装配体如图 3-12 所示。

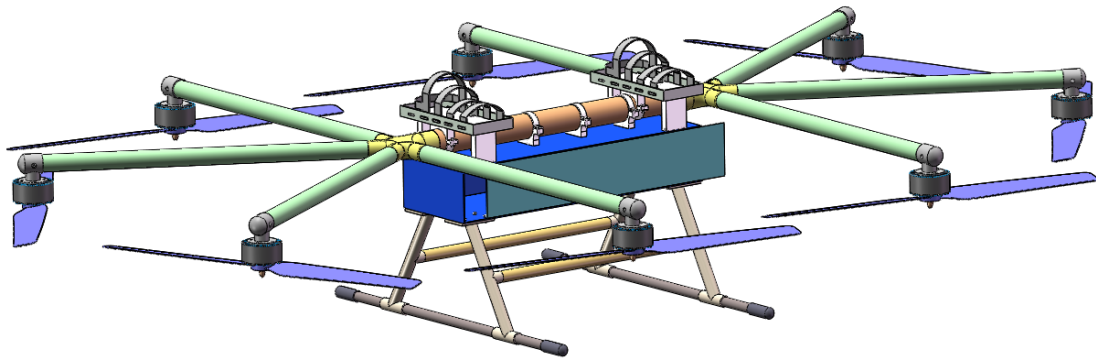


图 3-12 脚踩式飞行器结构图

## 第四章 脚踩式飞行器关键结构分析

### 4.1 有限元法的基本概念及分析步骤

要明确脚踩式飞行器关键结构的相关力学特性，使用有限元法<sup>[12]</sup>进行分析将是高效且准确的。随着有限元法在力学性能分析中的地位越来越高，已经成为现代信息技术的重要理论基础，可高效率地实现对复杂微分方程的求解。其中，有限元的数学理论、力学原理和相关计算机软件在该方法中的应用是必不可少的<sup>[13]</sup>。本文使用 SolidWorks 软件中的 Flow Simulation 插件和 Simulation 插件对桨叶进行了气动分析，对机臂进行了静力学分析。

通过有限元法来实现工程问题的求解可概括地分为以下几个步骤。

- 1、根据实际工况分析结构的受力特点。有限元法建立的初期包括：分析工件的外观形状特征、定义工件的材料属性、确定受力位置与定义边界条件及施加载荷等。所以，在有限元分析之前需要先清楚工件的结构特点和受力情况，包括工件的结构组成、工况载荷、零件接触类型以及边界条件；

- 2、建立有限元模型。将非必要的模型特征进行简化处理，使网格的划分更加合理，也有利于减少计算机运行时间，提高效率；

- 3、划分网格。SolidWorks 软件是通过对工件离散化的原理来求解，将各单元通过节点连接起来，不同的网格质量将直接影响分析的效率，因此，计算分析前的关键一步就是网格划分；

- 4、施加约束条件及载荷。根据第 1 步对工件分析得出的结论来确定工件施加的约束条件和载荷；

- 5、分析计算。根据工件的结构特点和材料属性，采取针对性的分析方式，对做好前处理的工件进行有限元分析运算；

- 6、后处理。观察有限元分析后的结果，明确分析对象的受力及变形情况，合理地输出对应的应力、应变、及位移云图等直观显示的结果。

### 4.2 旋翼流固耦合分析

旋翼是本次脚踩式飞行器设计中最重要结构，旋翼在飞行器的正常工作状态下，其结构是否能够稳定运行，直接影响着驾驶人员的生命安全，本文对旋翼采用流固耦合分析法<sup>[14]</sup>，验证其设计强度可靠性<sup>[15]</sup>。

- 1、首先，将旋翼与电机简化后的装配体导入 SolidWorks 软件中的 Flow Simulation 插件中进行流体力学模拟，进行外流场设置向导，选取外部分析类型，以 z 轴为参考轴，以空气作为项目流体。

2、将计算域设置为 x 轴方向-1.35m-1.46m,y 轴方向-1.35m-1.46m,z 轴方向-0.69m-4.01m。

3、将旋翼的所有表面全部选取为旋转区域。转速设置为 278rad/s。选取 z 轴力和扭矩作为表面目标,选取 z 轴的速度平均值和总压平均值作为全局目标。并将运算结束条件设为目标收敛。

4、共划分 65817 个网格,进行运算,最终迭代次数为 1331 次,耗时 21 分 56 秒运算完成。旋翼在以上给定条件下流动迹线如图 4-1 所示。

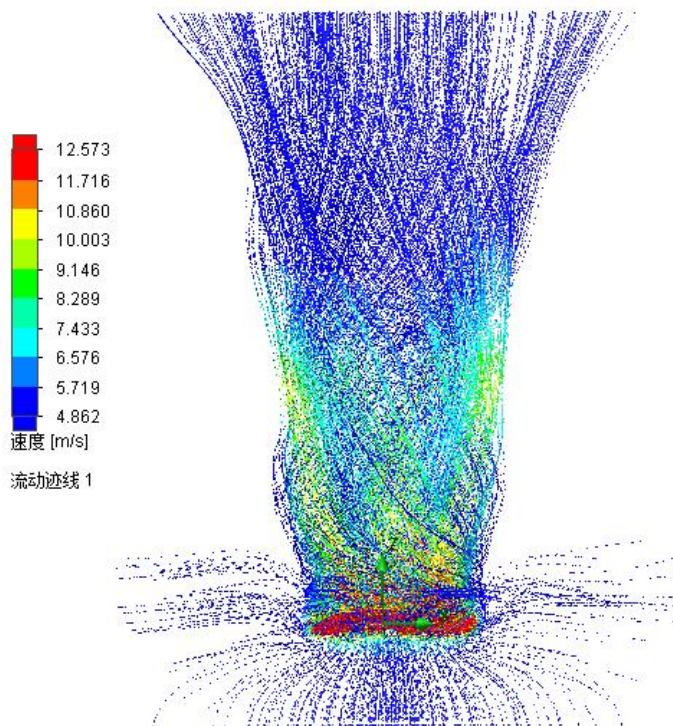


图 4-1 旋翼气体流动迹线图

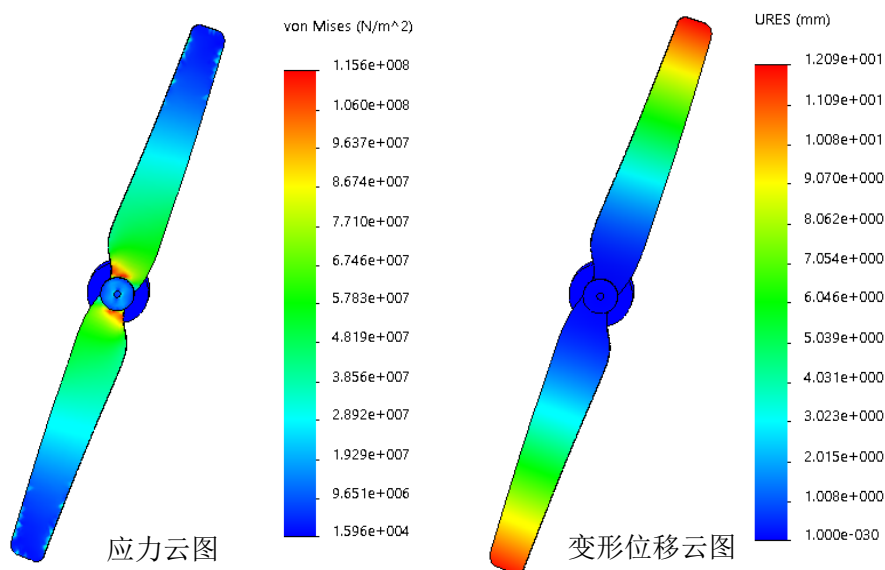
5、将 Flow Simulation 插件中的运算结构导出至 Simulation 插件中。

6、进入 Simulation 插件创建新算例,进行静应力分析。将旋翼赋予碳纤维材料。

7、将电机与旋翼选择为零部件接触接合,固定电机尾部。

8、外部载荷的选取分为两项。一是选择流动效应作为外部载荷,在液压选项中选择包括 SOLIDWORKS Flow Simulation 中的液压效应,并将软件数据导入其中。二是选择离心力作为外部载荷,选择旋翼中心作为参考,依然设置角速度为 278rad/s。

9、生成网格后,进行运算,运算结果如图 4-2 所示。旋翼最大变形发生在旋翼翼尖位置,最大变形量为 12.09mm,最大应力集中在旋翼根部,最大应力为 115.6Mpa。均在允许范围内,因此旋翼材料和尺寸的选择是合理的。



4-2 旋翼流固耦合分析结果

### 4.3 机臂静力学分析

电机与旋翼均固定于机架力臂的端部，旋翼的升力是飞行器起飞的关键，作用在机臂端部的推力通过机架力臂汇集到飞行器中心，因此，机架力臂的强度分析也是本文的关键。

将机架力臂的简化结构导入 SolidWorks 软件中的 Simulation 插件中，赋予碳纤维材料，固定机架力臂与五通管连接的端面，在连接电机座一端的圆柱面上加载 187.5N 推力，方向垂直向上。生成网格后进行运算，运算结果如图 4-3 所示。机架力臂最大变形发生在连接电机座的一端，最大变形量为 2.96mm，最大应力集中在机架力臂连接五通管的一端，最大应力为 32.03Mpa。均在允许范围内，因此机架力臂材料和尺寸的选择是合理的。

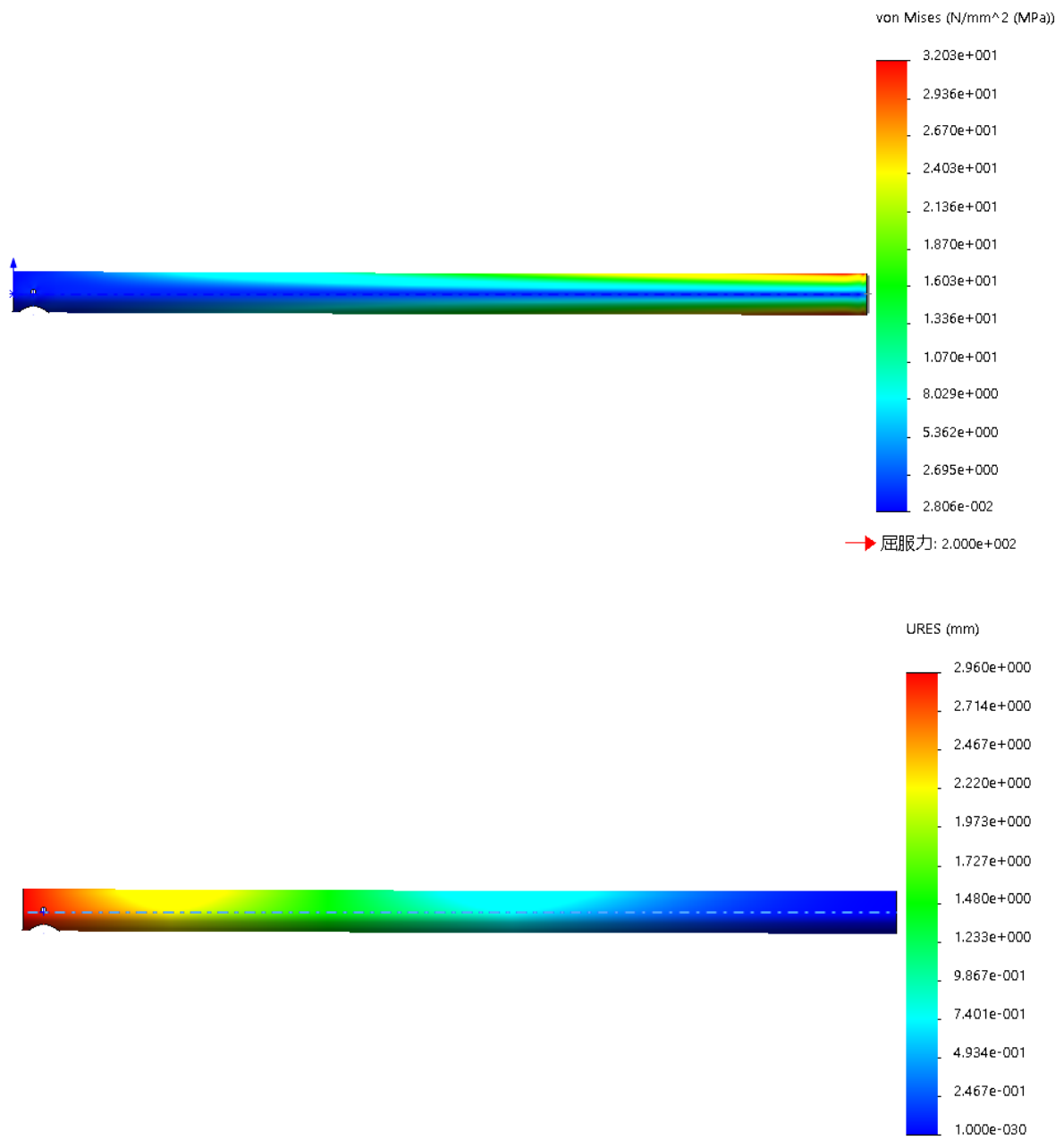


图 4-3 机臂静力学分析结果

## 第五章 总结与展望

### 5.1 总结

通过对单人式飞行器发展现状、意义的研究,将脚踩式飞行器作为研究对象。脚踩式飞行器具有简单的结构设置,安全可靠的性能,在民用和军用两方面都存在巨大的价值。本课题对脚踩式飞行器进行重量分析,选择合适的动力装置,完成脚踩式飞行器的结构建模,并对飞行器中的关键零部件进行了有限元分析。这些工作为脚踩式飞行器的产品落地打下了坚实基础。现将本文主要研究内容和工作总结如下:

(1) 根据现有飞行器的机械结构和多旋翼飞行器的飞行原理确定脚踩式飞行器的机械结构和飞行原理,考虑到载人安全性能选用八旋翼作为升力来源。根据脚踩式飞行器结构设计分析得出飞行器的重量以及载人重量,从而确定悬停状态下飞行器所需升力。根据升力需求和飞行时长选择鹰动力 Eagle power EA120 电机搭配 UC40130 40 英寸碳纤维直桨,ACE 格氏 22000mAh 12S 雨燕锂电池作为动力能源。

(2) 将已经选择的电机、旋翼、电池尺寸作为结构设计的基础,确定机臂、中心管、五通管、电机座、电池盒、起落架的结构尺寸。根据人机工程学设计脚踩固定器尺寸,以及两脚踩固定器的水平距离。利用 SolidWorks 软件对上述零部件和装配连接件进行结构建模,最终将所有零件导入装配体进行整机组装配合,完成脚踩式飞行器的整体装配工作。

(3) 建立简化的碳纤维旋翼模型,给定必要条件后,转速设置为  $278\text{rad/s}$ ,对旋翼进行流体分析,得出流动迹线图,将分析数据导入静力学分析,得出流固耦合状态下旋翼的应力与位移数值,旋翼的最大应力小于材料的许用应力,证明旋翼设计的可靠性。建立碳纤维机架力臂简化后的有限元模型,进行结构静力学下的强度分析,得到的结果是最大应力远小于材料的许用应力,从而证明机架力臂的结构强度满足飞行器飞行时的受力要求。

### 5.2 展望

本文完成了脚踩式飞行器的结构与主要零件的强度分析,但脚踩式飞行器的研究是一个系统且复杂的工作,限于时间和知识储备的不足,很多方面未能进行深入全面的研究和试验,还有很多需要改进和解决:

(1) 本文脚踩式飞行器只进行了结构设计,飞行控制系统以及电路安排未进行研究分析。后续研究需要对飞行控制系统等电器系统进行设计研究。

(2) 对脚踩式飞行器旋翼进行有限元分析时,只对飞行器在悬停状态下进行了强度分析。在实际飞行过程中,飞行器有多种飞行姿态,后续可对其他姿态下旋翼强度进行分析,以及整机在飞行状态下的动力学分析。

(3) 脚踩式飞行器续航时间较短,可以选用电池容量大,重量轻的新型电池。

## 参考文献

- [1] 赵利铭. 个人飞行式高层建筑火灾逃生装置研究与设计[D]. 东北林业大学, 2015.
- [2] 范馨文. 人工智能对于技术的哲学研究[J]. 科学技术创新, 2020 (05): 84-85.
- [3] Bing Cheng, Cheng Bing. The Research on Redundant Design in Civil Aircraft Design[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 887(1).
- [4] 苗子. 现代作战新装备—单兵飞行器[J]. 少年电脑世界, 2021 (09): 18-19.
- [5] 刘浩蓬. 植保四轴无人飞行器关键技术研究[D]. 华中农业大学, 2015.
- [6] 杨成顺. 多旋翼飞行器建模与飞行控制技术研究[D]. 南京航空航天大学, 2013.
- [7] 马瑞君. 基于 STM32 的四旋翼飞行器的设计与研究[D]. 山东科技大学, 2020.
- [8] 陈思婧, 朱清华, 何振亚, 王永杰, 刘佳. 载人多旋翼飞行器动力单元选型方法研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(02): 112-121. DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.02.13.
- [9] 何昱. 基于无刷电机的航模系统的研究[D]. 武汉理工大学, 2008.
- [10] 喻辉. 重载四旋翼民用无人机设计与强度计算[D]. 中国民用航空飞行学院, 2017.
- [11] Liang YenChu, Chin PeiChieh, Sun YunPing, Wang MuhRong. Design and Manufacture of Composite Landing Gear for a Light Unmanned Aerial Vehicle[J]. Applied Sciences, 2021, 11(2).
- [12] 张晋红, 吴风林. 有限元法及其应用现状[J]. 建材技术与应用, 2007(04): 9-10. DOI: 10.13923/j.cnki.cn 14-1291/tu.2007.04.004.
- [13] 孙晓恒. 油动四旋翼飞行器的力学性能分析[D]. 沈阳工业大学, 2020. DOI: 10.27322/d.cnki.gsgyu.2020.000140.
- [14] 王浩. 叶片流固耦合振动分析方法研究[D]. 南京航空航天大学, 2012.
- [15] A.K. Slone, K. Pericleous, C. Bailey, M. Cross. Dynamic fluid–structure interaction using finite volume unstructured mesh procedures[J]. Computers and Structures, 2002, 80(5).

## 致 谢

行文至此，毕业将至，回首大学时光，脑海中只剩下了美好的画面。或许曾有过迷茫与挫折，但那早已被遗忘。在此期间我得到了成长，收获了知识。借论文即将完成之际，对帮助过我的所有人表达最真诚的谢意。

感谢姚冀涛老师对我论文的悉心指导。从论文的选题到完成都离不开老师的帮助，老师渊博的知识、严谨的治学态度，使我受益颇多。

感谢最亲密的父母及家人，他们永远是我最大精神支柱，也是他们的支持才让我有了更多的动力。

最后感谢大学期间帮助过我的所有的老师、同学与和朋友。在此对所有人表示我最衷心的感谢。