



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

本科生毕业设计

球形无人机的设计与校核
The Design and Check of Spherical Unmanned Aerial Vehicle

姓 名 岳金玉

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

球形无人机的设计与校核
The Design and Check of Spherical Unmanned Aerial Vehicle

姓 名 岳金玉

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	球形无人机的设计与校核						
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，国内外的矿难、地震等自然灾害的频发，造成严重后果和恶劣影响。然而无人机在此方面的搜救功能应用较少。但是此类无人机的研发难度大，相比于其他应用领域的无人机，其应用情况相对滞后。目前市面上常见的无人机机架的主体结构大多采用方形且可折叠性较差。再者，在矿山坍塌、地震等环境情况下，无人机在进入坍塌区域后，由于自身外形的限制，很容易在一定范围内寸步难行。</p> <p>针对背景中发现的问题，提出在将无人机外形设计为球体结构，提高了无人机对矿山坍塌、地震等环境情况的适应性，以达到无人机在飞行救援时更好保护内部结构以及更多避免受外部环境干扰的影响。</p>						
任务及要求	<p>本课题是基于结构学，运用多旋翼无人机学科等方面知识，在借鉴国内外球形飞行器研究成果的基础上，设计一款变体无人机。</p> <p>本课题主要研究的内容分为三个方面，内容如下：</p> <p>(1)分析了无人机在矿洞坍塌、地震等人为和自然灾害的环境前提下，如何更有效率的进行搜救。</p> <p>(2)在球形的外形基础上，设计更简单有效且可靠的内部结构，使用 solidworks 建立模型，并进行力学分析。</p> <p>(3)在总体结构设计完成后，对于全机身在保证强度的情况下，进行轻量化设计并校核：设计洞察、参数优化以及拓扑优化。</p>						

工作条件	实验室能够提供毕设所需的软、硬件，能够满足毕设要求。
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. 具备工程力学相关知识； 3. 掌握相关分析计算方法； 4. 有相关绘图知识基础； 5. 具备飞机结构学和空气动力学基础知识。 <p>能力要求：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 具备较强的自主学习能力； 2. 熟练运用 solidworks, CAD, 等绘图软件； 3. 能够使用 3D 打印机, 逆向扫描仪等设备。
<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： 球形无人机的设计与校核

学 院： 航空航天学院

专 业： 飞行器制造工程

学生姓名： 岳金玉

学 号： 18414030111

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

无人机是一种以无线电操控或以自编程序控制装置飞行轨迹的不载人飞行器，在装备了必要的数据传感系统及通讯系统的情况下，无人机可在无干预的情况下自主完成飞行任务。随着对于无人机的需求越来越广泛，常规无人机的弊端逐渐显露。其中飞行空间的局限是飞行器飞行过程中的最大阻碍。在城区等环境执行飞行任务时，由于障碍物增多，飞行环境复杂，飞行碰撞概率增大，易导致飞行器坠落致使任务失败。因此，无人机对于防撞性能的要求变得不可忽视。本文基于现有小型无人机的特点，对于制作出的一款适合在救灾环境中飞行的球形飞行器进行介绍和比较。

近年来，我国各地矿山、地震等自然灾害频发。在灾难发生后上级需要在第一时间内了解灾区情况制定有效的救援措施，但是有些重灾区无法通过人为方式进行勘察。在实施救援措施前，救援人员需要对坍塌区域进行初步勘测。救援人员对坍塌区域进行第一次打孔后，无人机进入洞内，在一定范围内进行移动并绘制地形地貌，为后续工作做好准备。灾情过后，由于地形环境较复杂，而市场上现有无人机在执行此类任务时因外形设计和收缩结构，在打孔后的洞内寸步难行，影响工作效率。再者，无人机在执行此类任务时因旋翼外置的结构设计，会对旋翼造成伤害。因此本团队的八旋翼球体无人机将外壳设计为球体，提高了无人机对环境的适应性，便于在地形复杂的洞穴内更好地执行任务。同时，我们将旋翼叶片设计在壳体内，保护旋翼，减少灾后复杂地形对无人机工作的影响，以更高的效率完成工作任务，为救援后续工作争取更多时间。

2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

本课题是基于机械设计原理，运用多旋翼无人机学科等方面知识，在借鉴国内外球形飞行器研究成果的基础上，设计一款变体无人机。

本课题主要研究的内容分为三个方面，内容如下：

(1)分析了无人机在矿洞坍塌、地震等人为和自然灾害的环境前提下，如何更有效率的进行搜救。

(2)在球形的外形基础上，设计更简单有效且可靠的内部结构，使用solidworks建立模型，并进行力学分析。

(3)在总体结构设计完成后，对于全机身在保证强度的情况下，进行轻量化设计并校核：设计洞察、参数优化以及拓扑优化。

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) 一套完整的无人机 solidworks 模型
- (3) 一套无人机关键结构力学分析数据

4. 推荐参考资料:

- [1] A.Klaptocz,D.Floreano,J.-C.Zufferey (Dirs.).Design of Flying Robots for Collision Absorption and Self-Recovery. EPFL, Lausanne, 2012: C-9
- [2] Adrien Briod, Przemyslaw Kornatowski, Jean-Christophe Zufferey, Dario Floreano. A Collision-resilient Flying Robot[J]. Journal of Field Robotics, 2014, 31(4): 496 -509.
- [3]李鹏一种球形飞行器的设计与飞行特性研究[D].北京邮电大学, 2013
- [4]吴怀宇,周兆英,熊沈蜀,王晓浩,叶雄英,李勇.微型飞行器的研究现状及其关键技术[J].武汉科技大学学报(自然科学版),2000(02):170-174.
- [5]朱自强,王晓璐,吴宗成,陈泽民.小型和微型无人机的气动特点和设计[J].航空学报,2006(03):353-364.
- [6]陈安强.一种球形无人机的方案设计[C]//2014（第五届）中国无人机大会论文集.,2014:571-577.
- [7]肖大华. 微小型球形飞行器的研究与设计[D].北京理工大学,2015.
- [8]胡宇群,童明波,昂海松.微型飞行器及其关键技术.中国航空学会航空百年学术论坛[C].
- [9]崔秀敏,王维军,方振平.小型无人机发展现状及其相关问题分析[J].飞行力学, 2005, 23(1):14-18.
- [10]刘小林.基于一种飞行球形机器人的运动控制研究[D].北京邮电大学, 2018

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：球形无人机的设计与校核

学 院： 航空航天学院

专 业： 飞行器制造工程

学生姓名： 岳金玉

学 号： 18414030111

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

近年来，国内外的矿难、地震等自然灾害的频发，造成严重后果和恶劣影响。然而无人机在此方面的搜救功能应用较少。但是此类无人机的研发难度大,相比于其他应用领域的无人机,其应用情况相对滞后。目前市面上常见的无人机机架的主体结构大多采用方形且可折叠性较差。再者，在矿山坍塌、地震等环境情况下，无人机在进入坍塌区域后，由于自身外形的限制，很容易在一定范围内寸步难行。

2.选题目的

针对背景中发现的问题，提出在将无人机外形设计为球体结构，提高了无人机对矿山坍塌、地震等环境情况的适应性，以达到无人机在飞行救援时更好保护内部结构以及更多避免受外部环境干扰的影响。

（二）国内外研究现状

1.国外研究现状

2011年10月20日，日本防卫省技术研究本部在“Digital Content EXPO2011”博览会上公开展示并现场演示了其研发的球形飞行器，^[1]如图 1.1 所示。这款球形飞行器是个飞行时速可达 40 英里的微小型无人侦察飞行器，它能够垂直起降、定点悬浮、穿梭窄巷以及触地反弹。该飞行器最大的特点就是机动灵活，可进入狭窄建筑物的内部，甚至还可以沿楼梯上下飞行。如果坠落地面，这款飞行器会通过滚动的方式吸收撞击力，尽可能的防止损坏。该飞行器将主要应用于军事侦察，它还可以用于非军事用途，例如在灾区进行搜救工作。



图 1.1 日本球形飞行器

瑞士洛桑联邦理工学院的研究人员近日研制出一款号称不惧怕任何碰撞的球形飞行器 Gimball，^[2]其外形结构如图 1.2 所示。它有具有保护作用的机械陀螺原理的被动旋转球笼外壳，它可以在碰撞时保持飞行器稳定。直径 37mm，质量 370g。它可以遥控飞行或是自主飞行，自主飞行时可以将航迹反馈给地面操作人员。瑞士洛桑联邦理工学院

的研究人员在一片林地对进行实验，不论是撞到树上，在不平的地面上翻滚，还是飞跃树枝，都没有对飞行器特别是其内部元器件造成任何损坏。



图 1.2 Gimball

2.国内研究现状

国内也对球形飞行器进行了探索性研究。2012年，南京航空航天大学的研制团队在首届“中航工业”杯国际无人机大赛上展出了一款非常规布局的飞行器——X飞行器。其总体外形类似球形，如图 1.3 所示。该飞行器材料比较简单，飞行器的重量只有 200g，主要结构是由两块 KT 板“十”字交叉，位于两板交叉中上部的螺旋桨为飞行器提供主要的动力。

另外，2013年北京邮电大学的李鹏等人基于球形机器人的研究成果提出了一款单桨球形飞行器方案，^[3]如图 1.4 所示。该飞行器可以实现以任意姿态起降，同时还具有地面行走能力，外部有两圈圆形纵横交错的支撑框，这样能有效地对螺旋桨进行保护。

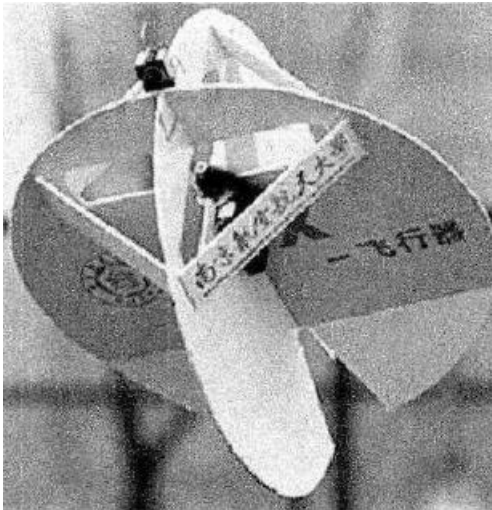


图 1.3 X 飞行器



图 1.4 单桨飞行器

（三）研究的主要内容

本课题是基于结构学，运用多旋翼无人机学科等方面知识，在借鉴国内外球形飞行器研究成果的基础上，设计一款变体无人机。

本课题主要研究的内容分为三个方面，内容如下：

(1)分析了无人机在矿洞坍塌、地震等人为和自然灾害的环境前提下，如何更有效率的进行搜救。

(2)在球形的外形基础上，设计更简单有效且可靠的内部结构，使用 solidworks 建立模型，并进行力学分析。

(3)在总体结构设计完成后，对于全机身在保证强度的情况下，进行轻量化设计并校核：设计洞察、参数优化以及拓扑优化。

（四）参考文献


- [1] A.Klaptocz, D.Floreano, J.-C.Zufferey (Dirs.). Design of Flying Robots for Collision Absorption and Self-Recovery. EPFL, Lausanne, 2012: C-9
- [2] Adrien Briod, Przemyslaw Kornatowski, Jean-Christophe Zufferey, Dario Floreano. A Collision-resilient Flying Robot[J]. Journal of Field Robotics, 2014, 31(4): 496 -509.
- [3]李鹏一种球形飞行器的设计与飞行特性研究[D].北京邮电大学，2013
- [4]吴怀宇,周兆英,熊沈蜀,王晓浩,叶雄英,李勇.微型飞行器的研究现状及其关键技术[J].武汉科技大学学报(自然科学版),2000(02):170-174.
- [5]朱自强,王晓璐,吴宗成,陈泽民.小型和微型无人机的气动特点和设计[J].航空学报,2006(03):353-364.
- [6]陈安强.一种球形无人机的方案设计[C]//2014（第五届）中国无人机大会论文集.,2014:571-577.
- [7]肖大华. 微小型球形飞行器的研究与设计[D].北京理工大学,2015.
- [8]胡宇群, 童明波, 昂海松.微型飞行器及其关键技术.中国航空学会航空百年学术论坛[C].
- [9]崔秀敏, 王维军, 方振平.小型无人机发展现状及其相关问题分析[J].飞行力学, 2005, 23(1):14-18.
- [10]刘小林.基于一种飞行球形机器人的运动控制研究[D].北京邮电大学，2018

二、进度及预期结果		
起止日期	主要内容	预期结果
2021.12.03- 2021.12.17	查阅球形无人机相关的文献, 确定设计的应用领域	确定好研究方向
2021.12.18- 2022.01.02	开题报告的撰写及修改完善	提交开题报告
2022.01.03- 2022.01.16	进行初步机体建模, 完成基本轮廓并根据记载设备确立机体的基本尺寸	确定基本尺寸
2022.01.17- 2022.01.30	根据需求设计运动简图, 在对于机构简化的同时不损失功能	确定机体主要结构
2022.01.31- 2022.02.20	继续进行对三维模型的建立	完成三维几何模型的基本构建
2022.02.21- 2022.03.06	在基本模型的基础上细化结构, 初步撰写论文	完成初步构型, 确定论文大框架
2022.03.07- 2022.03.20	分析结构受力情况, 使用有限元进行受力分析	完成受力分析
2022.03.21- 2022.04.03	根据受力分析结果, 优化结构	完成结构优化
2022.04.04- 2022.04.17	对于已完成的各个结构再分析, 确保机构功能不被减少并继续撰写论文	论文基本完成
2022.04.18- 2022.05.05	细化论文各章节, 完成毕业论文	完成论文的撰写
2022.05.06- 2022.05.22	使用 3D 打印机, 完成样机制作	完成样机制作

2022.05.22- 2022.06.03	准备答辩	完成答辩
完成课题的 现有条件	<p>1.具备良好的绘图和计算能力，能够进行无人机选型和校核计算，且对机构有较充分地理解；</p> <p>2.有较好的自学能力；</p> <p>3.熟练运用 solidworks， CAD， CATIA 等绘图软件；</p> <p>4.实验室配备 3D 打印机， 逆向扫描仪等工具。</p>	
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：所提交的毕业设计（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： 
年 月 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

随着科技的发展，无人机的应用领域越来越广泛。然而在矿难，坍塌，地震等复杂环境的搜救无人机相对来说比较匮乏。这是因为其地形环境复杂多变且可能发生二次坍塌，严重阻碍无人机的飞行。但在救援的黄金七十二小时，无人机可以更快更方便的搜救被困人员以及采集地形数据，辅助救援。所以本课题旨在设计一款球形变体无人机，主要应用在矿难，坍塌，地震等复杂环境，其外形结构为球形，可以在碰撞时减小对内部结构的损害，且拥有变体结构，更能适应复杂的环境，提高搜救效率。

本文通过前期对搜救无人机的应用领域现状进行分析，在借鉴国内外研究现状的情况下，确定无人机的设计目的以及设计用途；根据其使用工况来对无人机进行整体规划设计，确定其尺寸、结构布局等相关设计参数；再使用 Solidworks 软件进行三维建模，根据设计目的和用途设计其内部结构并对其装配和改进；最后对其关键部件进行静应力分析，并进行仿真模拟。

最后得出结论：本文设计的无人机满足起飞要求，且其结构强度足以满足其在复杂环境的工作需求。

关键词：球形无人机；四旋翼；可变体结构；静应力分析

ABSTRACT

With the development of science and technology, the application fields of UAVs are becoming more and more extensive. However, search and rescue drones in complex environments such as mine disasters, collapses, earthquakes are relatively scarce. This is because of the complex terrain environment and the possibility of secondary collapse, which seriously hinders the flight of UAVs. But in the golden seventy-two hours of rescue, UAV can search and rescue trapped people faster and more convenient and collect terrain data to assist rescue. Therefore, this paper aims to design a spherical variant UAV, which is mainly used in mining, collapse, earthquake and other complex environments. Its shape and structure are spherical, which can reduce the damage to the internal structure during collision, and have variant structures. It can adapt to complex environments and improve search and rescue efficiency.

This paper analyzes the application status of search and rescue UAV, and determines the design purpose and design purpose of UAV based on the research status at home and abroad. The overall planning and design of UAV is carried out according to its working conditions, and the relevant design parameters such as size and structure layout are determined. Then use Solidworks software for three-dimensional modeling, according to the design purpose and use to design its internal structure and assembly and improvement; finally, the static stress of the key components is analyzed and simulated.

Finally, it is concluded that the UAV designed in this paper meets the takeoff requirements, and its structural strength is sufficient to meet its working requirements in complex environments.

Keywords: Spherical UAV; quad rotor; variable structure; static stress analysis

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究的目的意义.....	3
1.3 研究的主要内容.....	3
第二章 无人机的总体设计方案	4
2.1 设计思路概述.....	4
2.2 无人机设计技术要求.....	4
2.3 初步概念设计方案.....	5
2.4 本章小结.....	5
第三章 无人机的结构设计	6
3.1 无人机整体结构呈现.....	6
3.2 机壳机构设计.....	7
3.3 机身结构设计.....	9
3.4 本章小结.....	12
第四章 静力学分析	13
4.1 动力系统以及材料的选型.....	13
4.2 参数计算.....	13
4.3 螺旋桨升力计算.....	14
4.4 静应力分析.....	15
4.5 本章小结.....	18
第五章 无人机关键结构的增材制造	19
5.1 光固化&打印原理.....	19
5.2 光敏树脂.....	19
5.3 模型切片.....	20
5.4 成品展示.....	20
第六章 总结与展望	21
参考文献.....	22
致谢.....	23

第一章 绪论

1.1 研究背景

近年来，国内外的矿难、地震等自然灾害的频发，造成了严重的后果和恶劣的影响，然而无人机在此方面的搜救功能应用较少。经市场调查，相比于其他应用领域的无人机,其应用情况相对滞后。目前市面上常见的无人机机架的主体结构大多采用方形且可折叠性较差。再者，在矿山坍塌、地震等环境情况下，无人机在进入坍塌区域后，由于自身外形的限制，在一定范围内会寸步难行。

针对发现的问题，本文提出将球形无人机外形设计为球体结构，机臂和起落架为可伸缩折叠结构，提高了无人机对矿山坍塌、地震等环境情况的适应性，且在碰撞情况下球体结构可以更好保护内部结构，以及更多避免受外部环境干扰的影响。

1.1.1 国外研究现状

2011 年日本某研究所在球形飞行器的研究中提出了一款具有穿梭窄巷和触地反弹等特点的微小型球形无人侦察飞行器^[1]，如图 1-1 所示。其最突出的特点就是灵巧敏捷，不仅可以进入狭窄建筑物的内部，还可以沿楼梯上下飞行。坠落地面后，会利用滚动的方式来吸收掉落时产生的能量，以保护内部结构。该球形飞行器主要应用于军事侦察。



图 1-1 日本球形飞行器

瑞士的研究人员研制出一款号称不惧怕任何碰撞的微型球形飞行器 Gimball^[2]，其模型结构如图 1-2 所示。它拥有的球笼式外壳可以在碰撞时保证飞行器的平稳飞行。研究人员在不同的飞行环境对其进行碰撞实验，不论是撞到树上，或是在地面上翻滚，还是飞跃树枝，都没有对飞行器内部结构造成任何损坏。



图 1-2 Gimball

1.1.2 国内研究现状

近年来，国内也针对微型球形飞行器进行了深入研究。2012 年，南航的研究团队研制出了一款非常规布局的飞行器——X 飞行器^[3]；如图 1-3 所示。该飞行器结构简单，体积小，重量轻；主要结构是由两块 KT 板交叉组合而成，由一个螺旋桨提供飞行所需的动力。

此外，2013 年北京邮电大学的科研人员基于已有的球形机器人研究成果提出了一款单桨球形飞行器方案^[4]，如图 1-4 所示。该无人机同时具备能以任意姿态起降和在地面行走的能力，且外部的框架能有效地对内部结构进行保护。

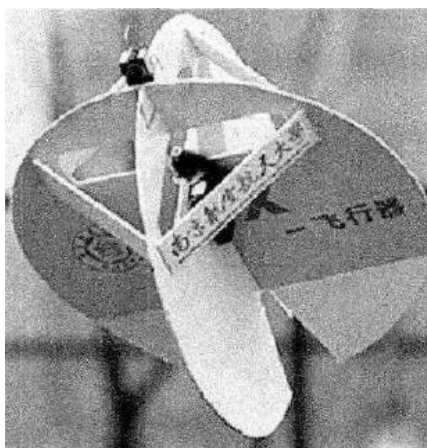


图 1-3 X 飞行器

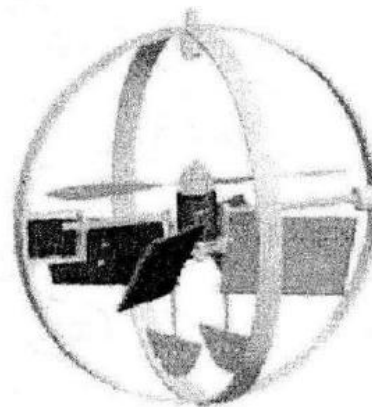


图 1-4 单桨飞行器

1.2 研究的目的意义

综上所述，球形无人机在碰撞的情况下可以更好的保护内部结构，可以更好的应对矿难、地震的复杂环境。然而其在矿难、地震搜救功能应用较少，结构多为一体式结构且不可根据工况进行变体。针对上述问题，本课题旨在设计一款球形变体无人机，它具有球体的外形设计，面对碰撞可以更好的保护内部结构；还拥有可收放式机臂和可收放式起落架，根据不同工况改变其形态。

1.3 研究的主要内容

本课题是在借鉴国内外球形飞行器研究成果的基础上，针对矿难、地震等复杂的工况下设计一款球形变体无人机，并验证其结构性能。

本课题主要研究的内容分为三个方面，内容如下：

- (1) 根据无人机的目的用途和飞行工况来设计其结构。
- (2) 对已经建模完成的模型进行运动学仿真，验证其运动原理。
- (3) 然后对模型进行受力分析，检查其结构是否满足需求。
- (4) 最后对模型的关键部件进行 3D 打印。

第二章 无人机的总体设计方案

2.1 设计思路概述

在上一章查阅文献了解国内外研究的基础上,我们发现市面上大多无人机其外形特征大多为方形且主体结构呈一体化等问题,无法适应地震、矿难等复杂环境。因此本课题提出设计一款新型球体变体无人机,来适应其复杂工况。无人机的总体设计方案可按照如图 2-1 所示的流程进行。

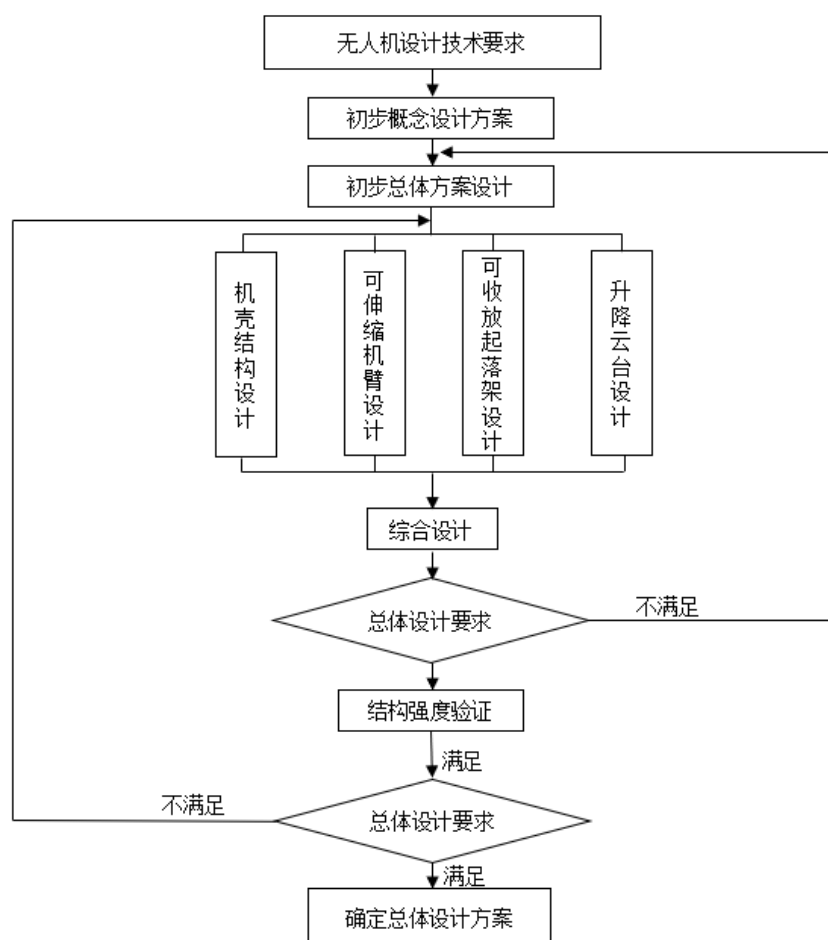


图 2-1 无人机总体方案设计流程

2.2 无人机设计技术要求

由于本课题所设计的无人机其使用场景为矿难、地震等环境,其使用目的为灾情检查,人员搜索,辅助搜救等功能,根据所查文献和国内外研究现状,得知将机身外壳设计为球体可以适应所矿难、地震等工况。根据其应用环境确定

其基本目标参数如表 2-1 所示。

表 2-1 目标参数

参数名称	目标数值
起飞总重	约 200g
最大载重	40g
最大飞行高度	50m
飞行速度	15m/s

2.3 初步概念设计方案

根据使用工况其复杂环境，将无人机整个球体尺寸设为 100mm，使其不仅可以通过 $\phi 225\text{mm}$ 救援钻孔到达矿难深处，也可以适应地震的房屋坍塌环境，并进行灾情探测、人员搜索和辅助救援。其球体尺寸确定了整体无人机的大小，并决定了此无人机为微小型无人机。

本文所设计的无人机整体结构为球壳式，并且在折叠状态下无人机的机臂和起落架可完全收放在无人机机身内，减少其在闲置时的占用空间，并且更方便携带。围绕本文设计思路，进行如下几方面的研究工作：

机臂均匀排布在圆柱形机身四周，保证其整体的平衡布局，且可以根据不同工况进行同时收放。在机身下端连接简单可靠的升降平台，结构简单、占用空间小且结构可靠。本课题还设计了可同时收放的可伸缩四脚起落架，一方面为了减少和吸收一部分无人机在降落时的撞击能量和降低无人机起飞时的地效，且可以在飞行途中进行收放，降低无人机在飞行时的阻力。

由于本课题设计无人机的使用工况，在保证其稳定性和安全性的前提下，选择总体重量相对较轻的四旋翼，以保证其灵活性以及续航时间。

2.4 本章小结

本章作为接下来开展的基础，首先确定了人机总体设计方案，再根据无人机的设计方案对无人机结构思路进行简单阐述，并介绍各个部件的功能。确定了无人机的设计要求，以及对无人机的旋翼个数进行选型，对进一步设计机械结构的建模打下基础。

第三章 无人机的结构设计

在上一章无人机总体设计思路的引导下，在根据预设的矿难环境下其 $\phi 225\text{mm}$ 救援钻孔尺寸来确定无球形无人机的整体直径设为 100mm 。在无人机整体外形尺寸确定的情况下，将整体模型分为机壳结构设计和机身结构设计。机壳结构分为机壳上蒙皮、机载仓筒和机壳下蒙皮；机身结构分为可伸缩机臂、可收放起落架以及升降云台，如图 3-1 所示。

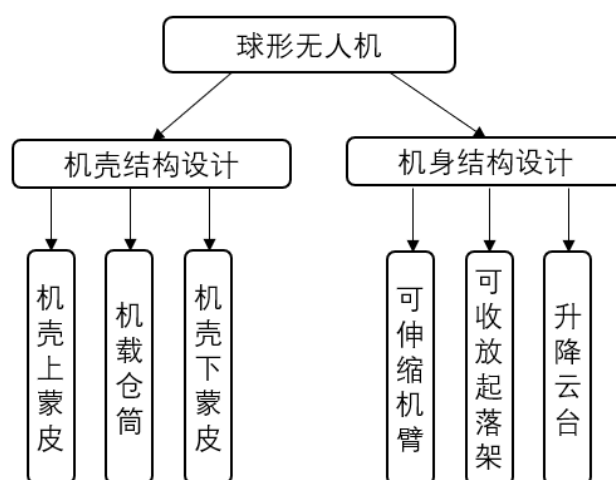


图 3-1 球形无人机主体结构图

3.1 无人机整体结构呈现

无人机整体为球形，其各个结构如图 3-2 所示，外形尺寸如图 3-3 所示。

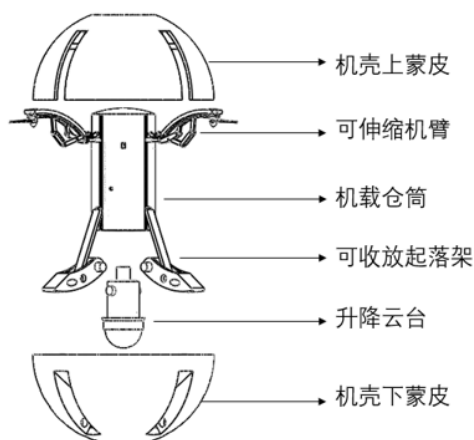


图 3-2 球形无人机结构图

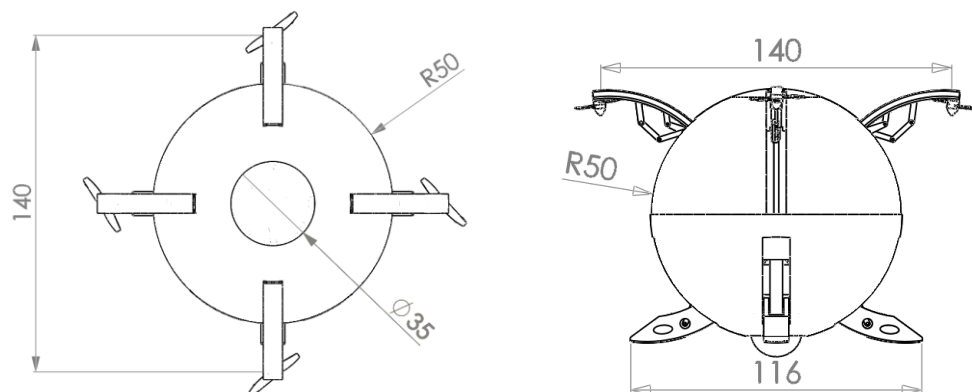


图 3-3 外形尺寸

3.2 机壳机构设计

3.2.1 机壳上蒙皮设计

目前市面上多旋翼无人机机身结构主要呈方形，且大部分机体为一体化结构。考虑到本课题所设计的无人机其应用环境的复杂性，根据所查文献和国内外研究现状，我们得知将机身外壳设计为球体可以更适应所预设的工况。上蒙皮设计呈弧面，不仅可以提升气动效率，且可以减少碰撞时的接触面积并可均匀分散撞击力。在强度刚度足够的情况下，上蒙皮采用薄壳体，其直径为 100mm，厚度为 2mm。其设计目的是一方面来减轻重量，另一方面为无人机内其他负载节省空间。在上蒙皮三分之一处高度添加一个十字交叉型内置框架来支撑可收放机臂的曲柄，且在结构内部上表面设铰链扣用来连接机臂；在其 38mm 处有圆周阵列的四个方形槽，用来伸出机臂以增加无人机飞行时的轴距。其特征结构和截面尺寸如图 3-4 和 3-5 所示。

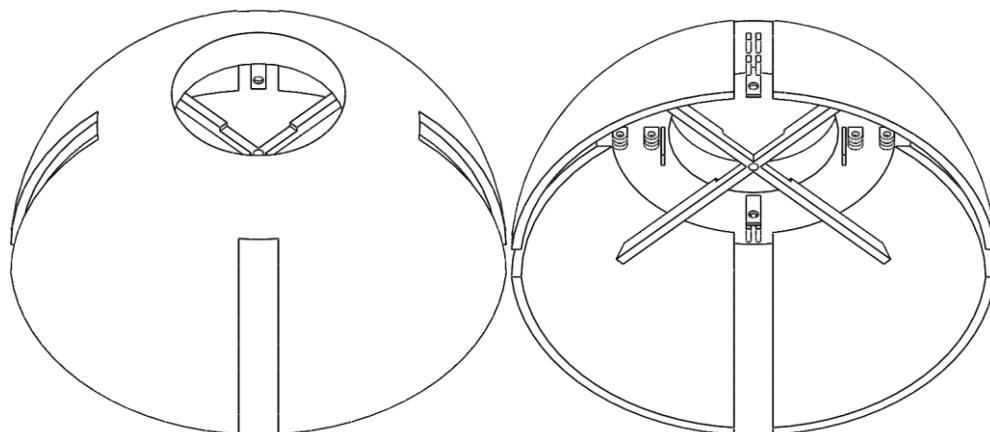


图 3-4 上蒙皮外形特征

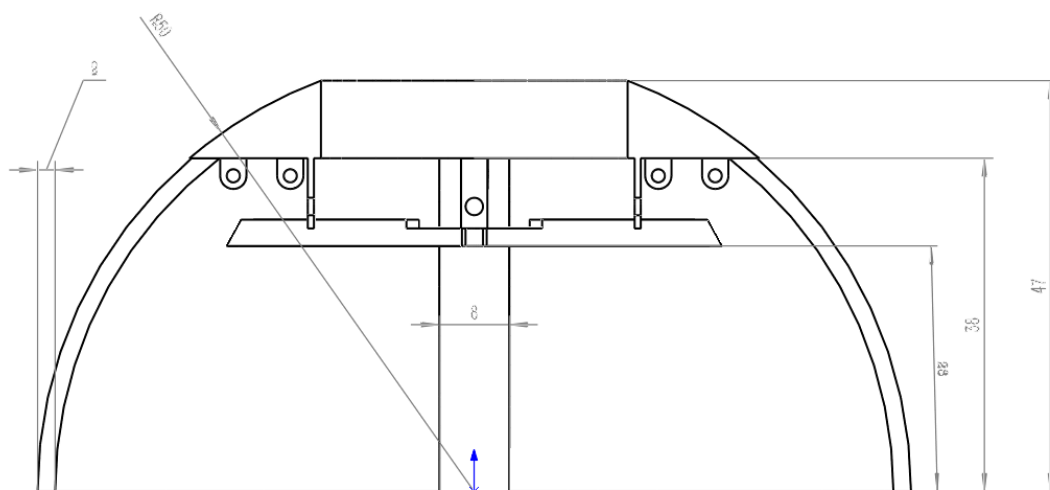


图 3-5 上蒙皮剖面尺寸图

3.2.2 机载仓筒设计

在球体的外形基础上，设计一个圆柱型机载双层仓筒，更均匀更有效的使用球体内部空间，且满足承载要求。套筒分为上下两部分仓体，上部分仓体主要搭载无人机控制系统以及电池等；下部分仓体主要挂载摄像头及其连接结构。其尺寸如图如 3-6 所示。

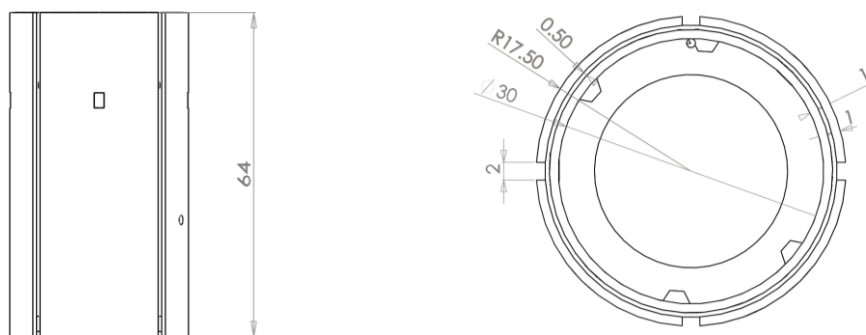


图 3-6 机载仓筒尺寸图

3.2.3 机壳下蒙皮设计

与上蒙皮相似，下蒙皮也采用薄壳体。在其 1/3 高度处留出起落架放置空间，使起落架可以并且在最底部留出负载升降空间，其结构和尺寸如图 3-7 和 3-8 所示。

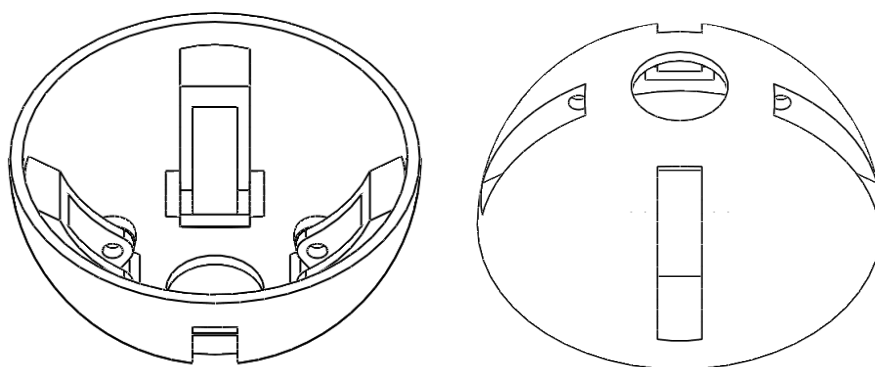


图 3-7 下蒙皮结构图

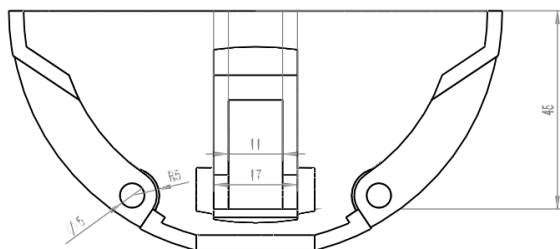


图 3-8 下蒙皮截面尺寸图

3.3 机身结构设计

3.3.1 可伸缩机臂设计

根据其可收放的需求，使机臂在收起时可以完美贴合起球形外壳；在机臂展开时可以保证螺旋桨垂直于地面以保证其气动效应。在初步设计时，其展开和闭合状态如图 3-9 和 3-10 所示。

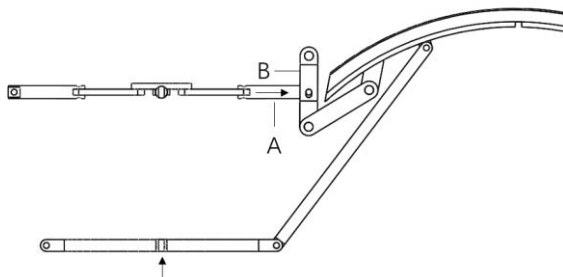


图 3-9 机臂展开状态

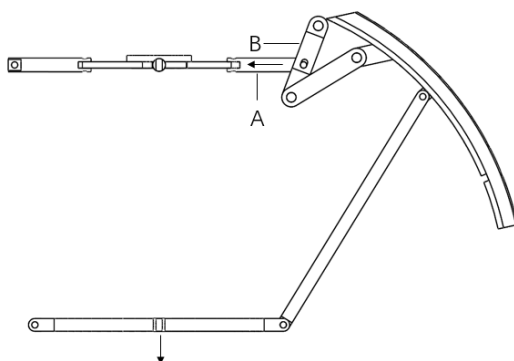


图 3-10 机臂闭合状态

机臂展开运动原理是由电机驱动曲柄推动与其相连的连杆 A；连杆 A 连接在连杆 B 的中下部滑槽处，且连杆 A 向前推动连杆 B 使连杆 B 有一定角度位移，保证机臂上方在伸出时不与机壳干涉且增大无人机轴距；同时下方丝杠驱动连轴环上移使其连杆支撑机臂上升至螺旋桨垂直与地面，收回同理。

由于结构拥有两个输入端，难以保证其一致性，所以我们将对结构进行自由度计算：

$$F = 3n - 2P_L - P_H \quad (3 - 1)$$

其活动构件 $n=7$ ，低副 $P_L=9$ ，高副 $P_H=0$ 。将数据带入公式 3-1，经计算自由度 $F=3$ 。下面对机臂折叠机构进行简化：

将可收放机臂设计成曲柄摇杆机构和四杆机构相组合，其结构简单可靠并可以满足需求。曲柄放置在上蒙皮内置框架，且曲柄摇杆机构连杆与四杆机构相连，并由卡扣限制其只有一个方向的运动。其工作原理是由中间电机控制曲柄旋转，带动其连杆。连杆和四杆机构通过一个滑动槽口相连，且连杆向右移动时带动四杆机构把带有螺旋桨的杆推至最高点使螺旋桨垂直于地面，且四个机臂可以同时打开，收回同理。如图 3-11 和 3-12 所示。

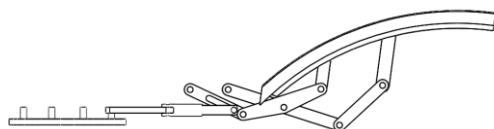


图 3-11 机臂展开状态

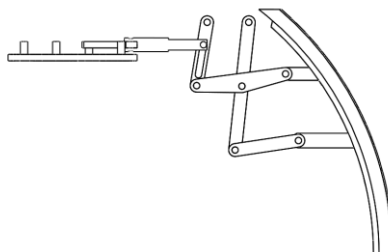


图 3-12 机臂闭合状态

对结构进行优化后，再进行自由度计算： $n=7$ ，低副 $P_L=10$ ，高副 $P_H=0$ 。将数据带入公式 3-1，经计算自由度 $F=1$ 。其输入端只有一个且可以满足其一致性；在取消了丝杠与连轴环结构后，不仅减轻了质量还留出了更多空间以便于安装负载。

3.3.2 可收放起落架设计

与机臂同理，无人机的着陆支架可收放，一方面可以减少空气阻力，另一方面可以防止阻碍工作部分的工作。而当起落架打开时需要足够支撑多旋翼重力，避免螺旋桨离地太近，而发生触碰，减弱起飞时的地效并且可以，消耗和吸收多旋翼在着陆时的撞击能量。与机臂不同，起落架一端固定在机身下蒙皮处，只需使其旋转一定角度即可满足设计需求。

起落架挂载在机身下蒙皮处，四个卡扣装配在机载设备支撑筒上，并用连杆将其与中心的联动环连为一体；用销轴将起落架各个连接。用联动环将四个滑动座联动在一起，并用一个小型电机驱动螺纹丝杠控制其上下滑动，从而实现对起落架的收放，如图 3-13 和 3-14 所示。

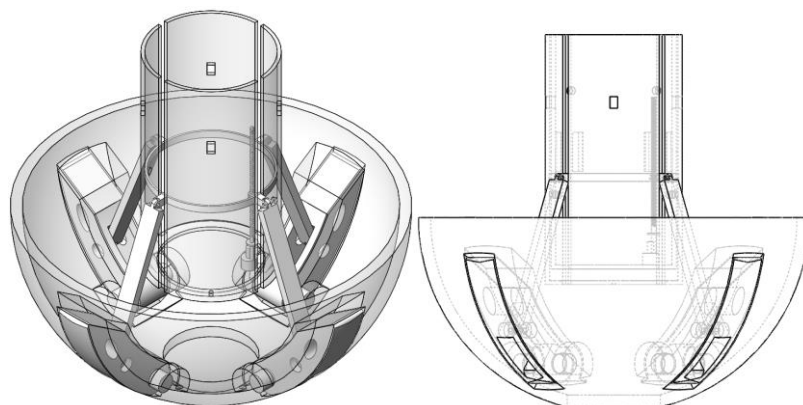


图 3-13 起落架闭合状态

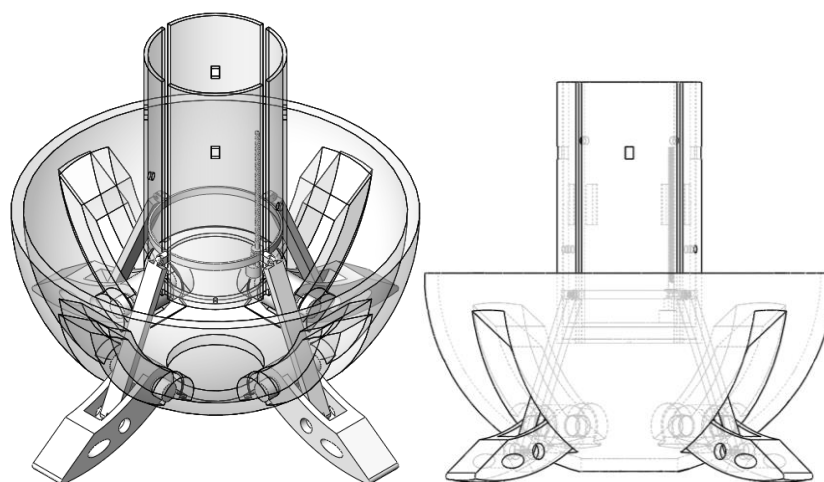


图 3-14 起落架展开状态

3.3.3 升降云台设计

球形变体无人机工作结构吊架设计成可收缩进机体内部的结构,有效保护其不受外界复杂环境伤害。由于其空间狭小,我们将其设计为圆柱凸轮机构,把旋转运动转换为直线运动。和其他的升降结构相比,其占用空间更小。其工作原理是使用电机驱动其输入轴,输出轴与输入轴通过销轴相配合,销轴在输入轴的滑槽内滑动,带动输出轴进行升降,其升降距离为 6.5mm,如图 3-15 和 3-16 所示。

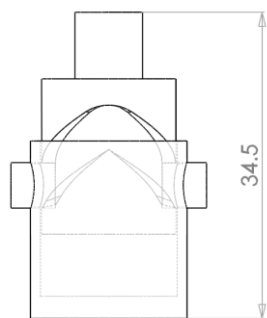


图 3-15 云台展开状态

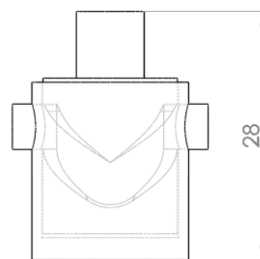


图 3-16 云台收起状态

3.4 本章小结

根据无人机的使用需求,对其各个结构进行三维建模。简述机构的运动原理以及检查其是否干涉,最后完成无人机的整体结构设计。

第四章 静力学分析

4.1 动力系统以及材料的选型

在确定其主要技术指标后，对其进行螺旋桨和电机的选型：

小型无人机大多选用双叶桨和三叶桨。在所需拉力相同的情况下，三叶桨所需的尺寸更小，但桨叶面与空气所接触的面积增大，其阻力也增大了，效率要比两叶桨要低。以电机为动力的小型飞行器，因电机转速较高而扭矩又较低，所以本文采用双叶桨。螺旋桨参数为 45mm 双叶桨，孔径为 0.95mm，桨宽度为 10mm。桨叶的材料也是采用碳纤维，其强度刚度高且重量轻，更适合高 KV 值电机。

电机可以把电池能转换为带动螺旋桨产生的机械能，根据其结构分为无刷电机和有刷电机。无刷电机因为其高效率、低能耗、低噪音、寿命长等特点而被广泛的应用在小型以及微型无人机中。所以本文采用无刷电机，电机型号为 GD8520，输出轴为 1mm，重量为 5.1g，转速为 50000 转/分钟。

常用的无人机材料有碳纤维、玻璃钢、聚碳酸酯、丙烯酸塑料、铝合金等。碳纤维密度低且强度刚度大，机身是承载多旋翼所有设备的平台，主要受重力的影响。在相同拉力的情况下，机身越轻意味着可分配的有效载荷越大。由于本文设计的无人机体积小，在不考虑价格因素和加工因素的情况下，机身外壳采用环氧树脂材质，其他结构为碳纤维材质。材料力学参数如表 4-1 所示。

表 4-1 材料的力学参数

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(t·mm ³)	强度极限/MPa
环氧树脂	2.415	0.35	1.6×10^{-9}	28
T700-12K 碳纤维	210	0.307	1.76×10^{-9}	3400

4.2 参数计算

无人机的起飞重量 W_T 表达式为：

$$W_T = W_P + W_S + W_{PE} + W_E \quad (4-1)$$

W_P 为任务载重，本机主要任务载重为摄像头，在此任务载重取 20g。

W_S 为机体结构重量，一般机体结构重量占起飞重量的 25%~35%，由于本课题所设计的无人机以结构为主，因此所占比例相对较大，取 60%；

W_{PE} 为固定设备重量，主要为电机，电调，飞控，螺旋桨等动力装置部件，据文献调查，取 20%；

W_E 为电池重量，在此取电池重量为 18g。

把取值代入公式（4-1）中，由此初步得出，飞行器的起飞重量约为：

$$W_T = \frac{W_p + W_E}{1 - 0.6 - 0.2} = 190g \quad (4-2)$$

为使飞行器能够满足设计要求，飞行器能够拥有更高的结构强度，初步预计起飞重量为 200g。

4.3 螺旋桨升力计算

根据螺旋桨拉力计算公式：

$$T = D \times P \times B \times N^2 \times 1 \times 0.00025 \quad (4-3)$$

T 为电机轴直径，单位 cm；

D 为螺距，单位 cm；

B 为桨叶宽度，单位 cm；

N 为电机转速，单位 r/s；

1 为大气压力；平原地区大气压设为 1 标准大气压，如果在高原地区，需要考虑其大气压力的降低，如西藏，压力在 0.6-0.7。1000 米以下基本可以取 1。

0.00025 为经验系数。

根据无人机起飞指标参数，在考虑无人机机臂宽度尺寸为 8mm，将电机机壳直径设计为 4mm,对电机和螺旋桨进行选型：螺旋桨为 45mm 双叶桨，孔径为 0.95mm，螺距为 3cm，桨宽度为 10mm；电机为 GD8520,输出轴为 1mm，重量为 5.1g，转速为 50000 转/分钟。

所以单个螺旋桨升力为 52.04g。那么无人机总升力为 208.1667g。升力大于起飞重量，所以电机及其搭配的螺旋桨满足起飞要求。

4.4 静应力分析

4.4.1 建立有限元模型

将装配体模型导入 Solidworks simulation 计算，由于设备计算能力的限制，在不影响计算结果的情况下，对装配体进行简化来减少计算时间。其边界条件为：由于装配体全局无干涉，所以将零部件接触选为全局接触-结合。将不参与计算的零件压缩，对无人机上表面壳体进行固定，剔除所有壳体使其不参与计算；把所有的螺旋压缩然后添加销钉连结；在螺旋桨处添加一个垂直向上的升力，根据上一节的螺旋桨计算结果为 50.24g，根据公式：

$$G = Mg \quad (4-4)$$

g 取 9.8，得知升力约为 0.5N,简化装配体模型如图 4-1 所示。

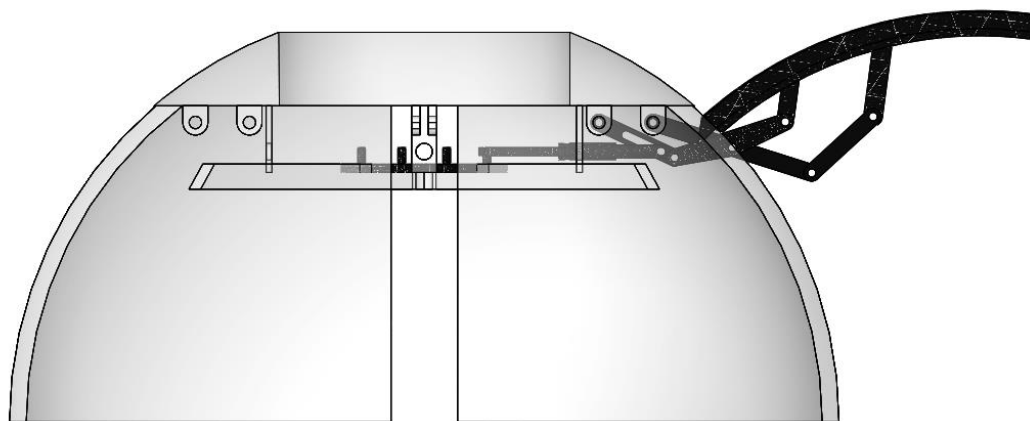


图 4-1 装配体模型简化图

4.4.2 划分网格

精确的有限元结果很大程度上依赖于网格质量，所以将对网格选择适当的网格大小和公差，可以做到节约计算资源和时间与提高精度的完美结合。划分网格参数表以及结果如表 4-2 和图 4-2 所示。

4-2 划分网格参数表

参数名称	参数结果
所选网格类型	基于混合曲率网格
雅可比点	16 点
最大单元大小	7.16mm
最小单元大小	1.43mm
节总数	11709
网格品质	高
单元总数	5018
最大高宽比例	3920.8

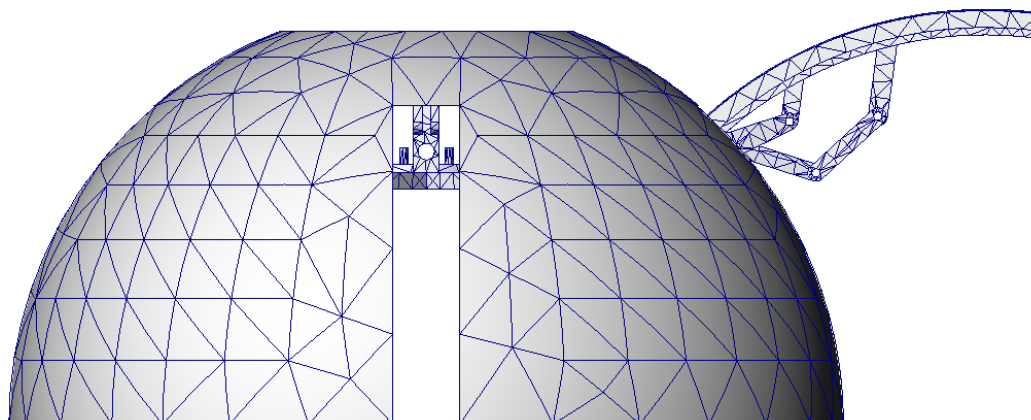
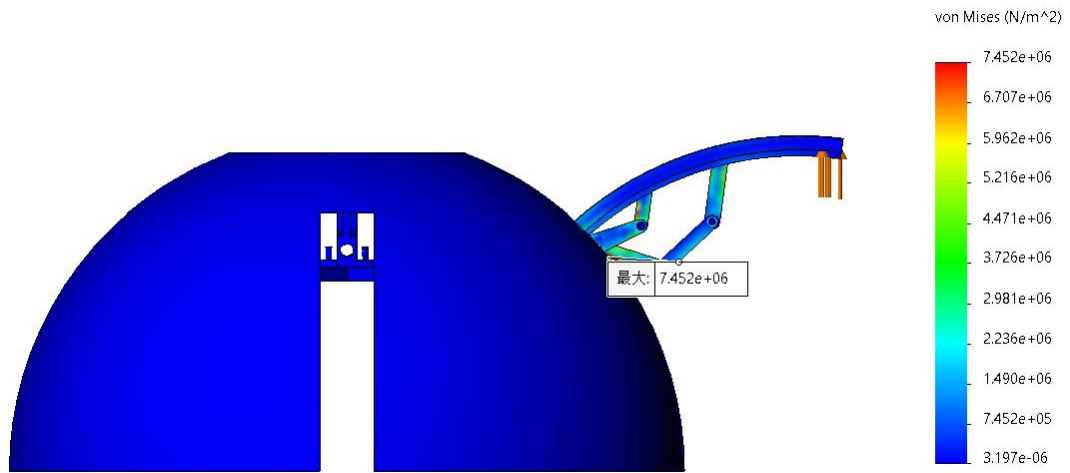


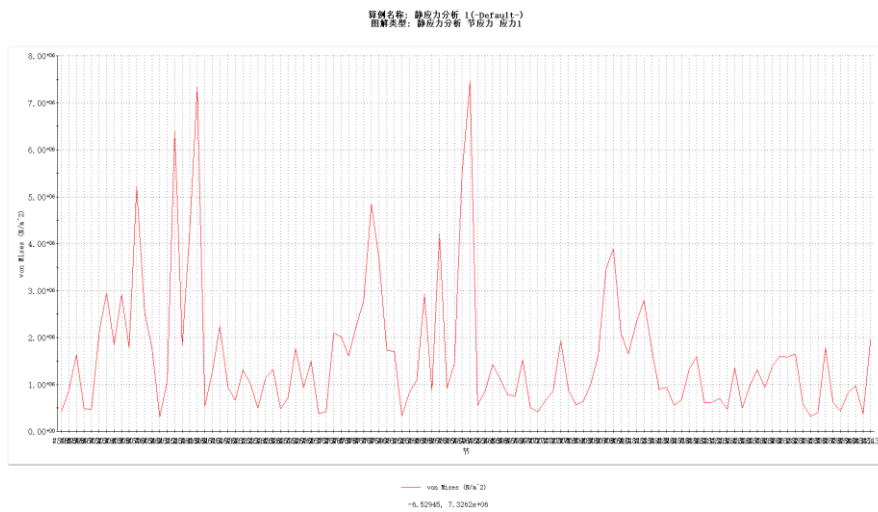
图 4-2 结构划分网格图

4.3.3 计算结果

如图 4-3 所示, 装配体最大应力为 7.45MPa。然后我们对应力最大处的连杆两个面施加探测, 验证其结构强度, 其结果图表如图 4-4 和 4-5 所示。可以看出其各个探测点的应力分布不均匀, 但是其最大应力大约为 7.4MPa, 远远小于碳纤维 T700 材料的屈服强度 240Gpa, 强度满足要求。如图 4-6 所示, 其最大位移处位于螺旋桨上的机臂顶端, 最大位移量为 0.016mm, 其力学位移也在允许范围内, 满足起飞需求。



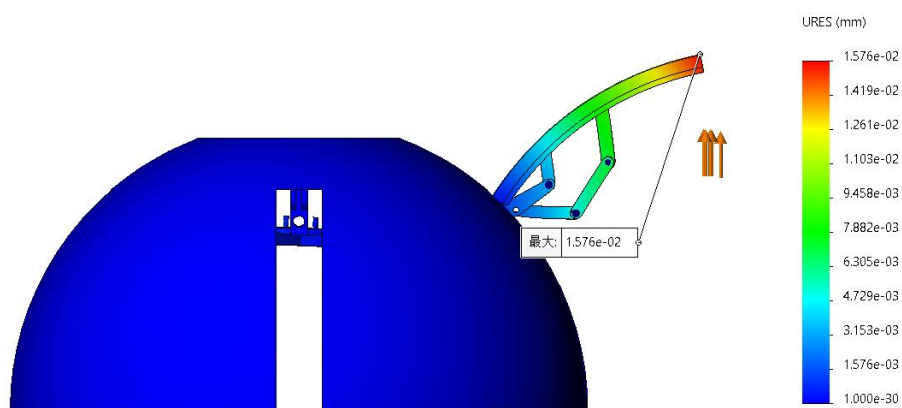
4-3 连杆最大应力图



4-4 连杆面 1 探测结果



4-5 连杆面 2 探测结果



4-6 连杆最大位移图

4.5 本章小结

在对无人机进行动力系统以及材料的选型之后，计算了无人机升力，并在 Solidworks simulation 里面对关键受力构件进行静应力分析，并在几处应力较大的零件施加探测，其结构应力变形量和位移量在允许范围内且满足强度要求。

第五章 无人机关键结构的增材制造

5.1 光固化&打印原理

光固化 3D 打印技术是一种快速增材制造的工艺方法，它的成型原理是:利用切片软件将三维模型数据转换成构成该三维模型的分层切片数据，在 3D 打印机上，每层切片数据所包含的二维图形会显示在屏幕上。在屏幕下有一面光源，由液晶屏控制选择性透光，以对液态光敏树脂进行照射，被照射到的区域液态树脂发生固化反应形成一层预设度的固态薄片，该薄片对应的就是该模型的一层切片数据。下一层以同样的方法生成并且和上一层无缝叠合。该工艺从零件的最底层开始，一次一层，逐层打印，直到该模型打印完成。一般切片厚度为 0.01~0.3mm，打印完成之后将模型从平台上取下清洗，进行打印后的硬化处理，再打磨、电镀、喷涂着色即可。如图 5-1 所示为 3D 打印机的控制原理示意图。

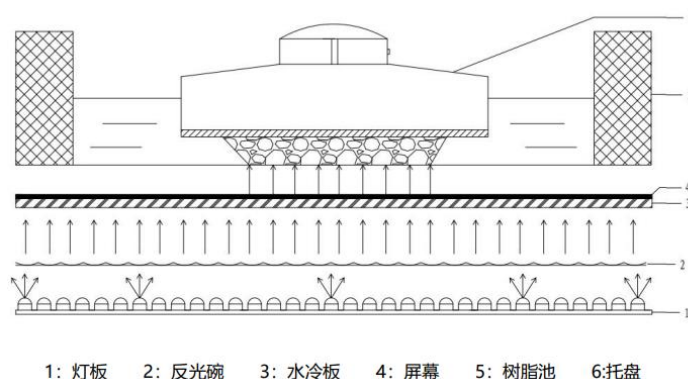


图 5-1 控制原理示意图

5.2 光敏树脂

在光固化打印中，光敏树脂是一个非常关键的因素。一款优秀的光敏树脂应具备以下特点：

- (1) 较高的成型精度。
- (2) 固化之后优异的物理性能。

(3) 合适的粘度。在最初几层的打印中，成型平台和树脂池底面之间的树脂会随着成型平台的下降被排出，因此树脂粘度越大成型平台收到的反力也就越大，会对整体结构有较大的强度要求。因此，光敏树脂的粘性不宜过大。

- (4) 良好的暗区抑制性。暗区树脂在打印一段时间之后不发生固化。

5.3 模型切片

将模型导入打印机之前要对模型进行切片设置。由于本课题所设计的无人机是小型无人机，其零件尺寸相对较小，所以搭配的支撑参数也许相应调整。支撑参数如图 5-2 所示。



图 5-2 支撑参数设置

5.4 成品展示

对机臂结构进行 3D 打印完成后，其成品如图 5-3 所示。

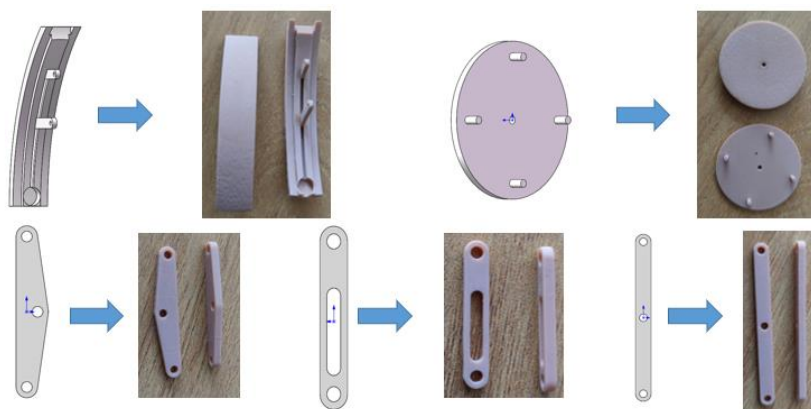


图 5-3 成品展示图

第六章 总结与展望

本课题是据地震、矿难等复杂工况设计一款球形变体无人机。通过计算和强度校核对比研究发现，该球形变体无人机能够达到所预设的变形效果，满足其起飞条件，为地震、矿难搜救领域的变体无人机提供结构上的参考。总结以上，本文主要完成了以下工作：

(1) 通过查阅文献和国内外研究现状，再根据无人机所预设的工作环境，确定了无人机的研究目的和研究意义。

(2) 首先确定了无人机总体设计方案，再根据无人机的设计方案对无人机结构思路进行简单阐述，并介绍各个部件的功能。确定了无人机的设计要求，以及对无人机的旋翼个数进行选型，对进一步设计机械结构的建模打下基础。

(3) 根据无人机的使用需求，对其各个结构进行三维建模。简述机构的运动原理以及检查其是否干涉，最后完成无人机的整体结构设计。

(4) 对无人机动力系统选型，并计算无人机的螺旋桨所提供的升力和最大起飞重量，并验算其是否满足起飞需求；对关键结构进行静应力分析，验证其结构强度刚度是否合理。

(5) 最后使用打印机打印出实体模型，可以更直观的检查其结构是否干涉。

综上所述，本课题所设计的无人机结构满足其使用工况；计算了无人机升力以及校核其结构强度，结果满足使用需求，最终完成了变体无人机的设计。由于本课题所设计的无人机结构重量较大，且偏向于结构设计，在动力系统和指挥控制系统所涉较少，对此提出以下几点展望：

(1) 优化飞行器可收放结构，在满足其收放要求的情况下选择更简单可靠的传动结构。

(2) 无人机整机结构强度虽然满足使用需求，但是总体结构冗余，可以对结构进行拓扑优化以减轻重量。

(3) 在模型打印完的基础上，可以添加动力系统和地面指挥系统以便于验证其起飞的真实性。

(4) 优化其机体外形，进一步提升气动效率。

参考文献

- [1] A.Klaptocz,D.Floreano,J.-C.Zufferey (Dirs.). Design of Flying Robots for Collision Absorption and Self-Recovery. EPFL, Lausanne, 2012: C-9
- [2] Adrien Briod, Przemyslaw Kornatowski, Jean-Christophe Zufferey, Dario Floreano. A Collision-resilient Flying Robot[J]. Journal of Field Robotics, 2014, 31(4): 496 -509.
- [3] 陈安强.一种球形无人机的方案设计[C]//2014（第五届）中国无人机大会论文集.,2014:571-577.
- [4] 李鹏.一种球形飞行器的设计与飞行特性研究[D].北京邮电大学, 2013
- [5] 吴怀宇,周兆英,熊沈蜀,王晓浩,叶雄英,李勇.微型飞行器的研究现状及其关键技术[J].武汉科技大学学报(自然科学版),2000(02):170-174.
- [6] 朱自强,王晓璐,吴宗成,陈泽民.小型和微型无人机的气动特点和设计[J].航空学报,2006(03):353-364.
- [7] 肖大华.微小型球形飞行器的研究与设计[D].北京理工大学,2015.
- [8] 胡宇群.微型飞行器中的若干动力学问题研究[D].南京航空航天大学,2002.
- [9] 崔秀敏, 王维军, 方振平.小型无人机发展现状及其相关问题分析[J].飞行力学, 2005, 23(1):14-18.
- [10] 刘小林.基于一种飞行球形机器人的运动控制研究[D].北京邮电大学, 2018
- [11] 喻金峰.四旋翼飞行器设计与实现[D].华南理工大学,2018.
- [12] 周鸿超,祁宇明,林伟民,王鹏,侯择尧,权利红,薛强.四旋翼无人机机身静力学分析[J].机械研究与应用,2018,31(05):66-68+71.DOI:10.16576/j.cnki.1007-4414.2018.05.021.
- [13] 柴永生,秦存平,姜曼,周京,杨尚贤,丁兆露.一种新型四轴飞行器的设计和结构分析[J].机械设计与研究, 2016, (3): 47-50.
- [14] 刘小雨.小型四旋翼无人机控制系统的设计与实现[D].扬州大学,2020.DOI:10.27441/d.cnki.gyzdu.2020.002413.

致 谢

时光如梭，转眼间大学四年的学习生活即将落下帷幕。在这充满活力的校园里，收获的不仅仅是学术知识，更是一份对自己的审视和对未来的思考，留下的是青春痕迹，不舍的是这群可爱的人。

首先，我要特别感谢傅雅宁老师和毕设导师姚冀涛老师。在老师的指导下，我掌握了独立学习和独立思考的能力，提升了自己主动拓宽知识面的意识。在毕设这半年多的时间里老师不辞辛苦，耐心指导，每周至少组织一次组会，让我们汇报自己的思路和工作进度，在建模过程中您给我指出了很多细节上我所注意不到的问题，在我陷入困难没有思路时，让我了解一些新型结构，引导我产生新的想法，在论文撰写过程中您耐心辅导，仔细批注修改，每当有问题询问时，您都会第一时间耐心解答。幸遇恩师，愿您工作顺利，健康幸福。

感谢中德的所有老师，未来的生活里会牢记老师们的谆谆教诲，感谢专业课老师传授知识，这些知识是完成这篇论文的基石，感谢辅导员王倩老师在生活和思想上给予的帮助。感谢大学四年的同窗，因为遇见你们，大学生活才会如此丰富有趣。

感谢陪伴我四年的室友们，感恩相遇，感谢陪伴，以梦为马，不负韶华，愿大家所得皆所期。愿我们保持热爱，奔赴山海，期待未来与更好的你们相遇。