



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

本科生毕业设计

竞速无人机机架结构设计
Frame Structure Design Of Racing UAV

姓 名 陈云飞

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 张健

职 称 讲师

完成时间 2022年5月30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

竞速无人机机架结构设计
Frame Structure Design Of Racing UAV

姓 名 陈云飞

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 张健

职 称 讲师

完成时间 2022年5月30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	张健		
专 业	飞行器制造工程			技术职务	正高	副高	中级
题目名称	竞速无人机机架结构设计						
题目类型	自拟	题目来源	其他项目				
课题来源、背景及意义	<p>随着人们生活的不断进步，无人机已经走入了人们的日常生活，无人机的使用已经变得十分普及，无人机和行业应用是无人机真正的刚需；目前在航拍、竞速比赛、农业、植保、测绘、新闻报道、电力巡检、救灾、影视拍摄等领域的应用，大大的拓展了无人机本身的用途，发达国家也在积极扩展行业应用与发展无人机技术。</p> <p>目前市场上的竞速类无人机的结构复杂，机体外形单一，稳定性差，复杂的机身结构造成了机身质量大，从而造成耗电量大、续航时间短，单一的机体外形也造成了电机输出动能的利用率不高；以上两点对竞速型无人机极其不利。另外，无人机机臂均为悬臂梁结构，机臂在碰撞时，极易出现断裂现象。因此，本设计利用拓扑优化的方法，对竞速无人机结构进行设计。</p>						
任务及要求	<ol style="list-style-type: none"> 1. 完成竞速无人机机架轻量化设计； 2. 完成竞速无人机折叠机构的设计； 3. 完成竞速无人机强度验证。 						
工作条件	Solid works 建模软件，拓扑优化软件						
知识与能力要求	<p>具有文献检索、收集资料及使用各种设计规范、手册和技术标准的能力；</p> <p style="padding-left: 20px;">具有飞机结构设计基本知识；</p> <p style="padding-left: 20px;">具有机械设计原理基础知识；</p> <p style="padding-left: 20px;">具有三维建模的能力。</p>						
系（教研室）审查意见：							
同 意							
负责人(签名): 张健 2022 年 11 月 28 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：竞速无人机机架结构设计

学 院：航空航天学院

专 业：飞行器制造工程

学生姓名：陈云飞

学 号：18414020323

起止日期：2021年12月3日~2022年6月3日

指导教师：张健

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

随着人们生活的不断进步，无人机已经走入了人们的日常生活，无人机的使用已经变得十分普及，无人机和行业应用是无人机真正的刚需；目前在航拍、竞速比赛、农业、植保、测绘、新闻报道、电力巡检、救灾、影视拍摄等领域的应用，大大的拓展了无人机本身的用途，发达国家也在积极扩展行业应用与发展无人机技术。

目前市场上的竞速类无人机的结构复杂，机体外形单一，稳定性差，复杂的机身结构造成了机身质量大，从而造成耗电量大、续航时间短，单一的机体外形也造成了电机输出动能的利用率不高；以上两点对竞速型无人机极其不利。另外，无人机机臂均为悬臂梁结构，机臂在碰撞时，极易出现断裂现象。因此，本设计利用拓扑优化的方法，对竞速无人机结构进行设计。

2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

工作内容及要求：

任务内容：

1. 完成竞速无人机机架轻量化设计；
2. 完成竞速无人机折叠机构的设计；
3. 完成竞速无人机强度验证。

任务要求：

1. 查找并学习相关参考文献 10 篇以上；
2. 独立完成毕业论文；
3. 能够通过分析，得出结论

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) Solid works 三维设计模型一套

4. 推荐参考资料：

[1]郝佳瑞. 吕利叶. 孙伟. 宋学官. 一种仿真数据驱动的小型无人机旋翼优化设计框架. 机械设计与制造. 2021-09-08.

[2]杨文亮. 韩亚丽. 许周凯. 戴银涛. 郁炜华. 小型陆空两栖无人机的结构与试验. 机电产品开发与创新. 2019-11-28.

[3]朱慧玲. 罗世彬. 刘俊. 微小型无人机旋翼气动设计研究综述. 飞行力学. 2018-05-30.

[4]文程祥. 小型四旋翼固定翼复合式无人机设计及控制研究. 长安大学. 2017-05-28

[5]昂海松. 微型无人机的设计原则和策略. 航空学报. 2015-11-27.

[6]贺欢. 世界微小型无人机最新发展应用概览. 中国安防. 2015-08-01

所在专业审查意见：

同意

负责人：张健

2021年12月10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：竞速无人机机架结构设计

学 院：航空航天学院

专 业：飞行器制造工程

学生姓名：陈云飞

学 号：18414020323

起止日期：2021年12月3日~2022年6月3日

指导教师：张健

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）

1. 研究目的及意义

随着人们生活的不断进步，无人机已经走入了人们的日常生活，无人机的使用已经变得十分普及，无人机和行业应用是无人机真正的刚需；目前在航拍、竞速比赛、农业、植保、测绘、新闻报道、电力巡检、救灾、影视拍摄等领域的应用，大大的拓展了无人机本身的用途，发达国家也在积极扩展行业应用与发展无人机技术。无人机竞速运动是近年新兴的科技运动，与电子竞技、机器人格斗一起，并称三大“智能科技运动”。

与常见的摄影无人机不同，竞速用无人机最高时速可达 230 公里，从 1 公里到 100 公里的加速不到 1 秒。技术上涉及空气动力、软件、电子工程等学科，对飞手的临场反应与操控技巧要求极高。

激烈竞速中，“炸机”（由于操作不当或机器故障等因素导致无人机不正常坠地）并不鲜见。无人机竞速除了比赛完成难度颇大以外，观看上也存在问题：无人机太小，外型也很相似，跟踪他们的移动甚至搞清楚是谁赢了，都不太容易。在专业的比赛中，无人机通常会在机身尾部或者机臂上装 LED 灯，方便观众区分。

目前市场上的竞速类无人机的结构复杂，机体外形单一，稳定性差，复杂的机身结构造成了机身质量大，从而造成耗电量大、续航时间短，单一的机体外形也造成了电机输出动能的利用率不高；以上两点对竞速型无人机极其不利。另外，无人机机臂均为悬臂梁结构，机臂在碰撞时，极易出现断裂现象。因此，本设计利用拓扑优化的方法，对竞速无人机结构进行设计。

2. 国内外研究现状

竞速无人机最初起源于国外，所以国外的技术比较成熟，但随着时间的流逝，国内与国外已相差无几。竞速无人机的最初原型是 FPV 飞行器，FPV 飞行器最初采用的是固定翼飞机搭载 FPV 设备进行飞行。一段时间之后，国外有人尝试将 FPV 设备搭载在更具操纵灵活性的多轴飞行器上进行飞行。随着其技术的日渐普及和逐渐演变，通过第一视角操纵飞行器穿越障碍物的多轴飞行器逐渐成熟并自成一派，即现在常见的竞速无人机。搭载了 FPV 设备后，竞速无人机的操纵方式从传统航模的“第三视角”变为“第一视角”操纵感受更像电子游戏，不仅能带给使用者身临其境的感官体验，同时也让竞速无人机具有了与传统航

模不一样的玩法。使航模玩法更加丰富多彩。目前,参与竞速无人机比赛的人数正在飞速增长。美国、加拿大、英国、意大利、瑞士、日本等国纷纷成立了竞速无人机联盟,制定了严格的赛事规范与各项标准,并定期组织大规模的专业赛事。

随着竞速无人机的普及和迅速发展,同时也出现了许多不可避免的问题,其中最严重突出的就是无人机机架断裂。下面我们大致介绍一下竞速无人机的机架。机架是竞速无人机的承载部件,用来固定电机、飞塔、电池、摄像头、相机等等几乎竞速无人机的所有部件。机架的强度、结构、材料、空气动力学对飞行性能都有很大的影响。所以要设计一个好的机架要考虑到很多因素,所以设计一个好的竞速无人机机架的难度可想而知。

由于竞速无人机的机架研究国内外几乎一致,所以我们再次将其组合到一块展示,其中会提出国外与国内的不同之处。

无人机机架的大小一般以两个距离最远的电机来决定。相对于来说四轴就是对角线的两个电机的距离,其测量单位都是毫米。在材料使用上绝大多数机架都选用碳纤维,之所以使用碳纤维是因为碳纤维的优点是强度高,重量轻。非常符合竞速无人机对速度的要求跟对强度的要求。其材料的使用情况通常是机臂部分会厚一点,比如4mm,其他部分可以相对而言会适当薄一些,比如1.5-2mm。除了碳纤维,有时还会用到铝管、3D打印件(TPU)等等材料,用来连接机架或固定相机、天线等从而加强竞速无人机的总体强度。机架按照机臂的个数可以分为3轴、4轴、6轴、8轴等等,竞速无人机使用最多的就是4轴。4轴相对来说更适合竞速无人机。

下面是几种常见的竞速无人机机架外形分类根据机架的几何外形,4轴机架也分好多种类型。

(1) True X

这种机架几何上完全对称,电机到中心的距离相等,其性能较均衡,重心较集中,这种机架每个面的旋转力矩都相等,飞起来比较平稳,操作感强。

(2) Wide X

这种机架左右两边电机的间距大于前后电机间距,又叫宽X。这种机架在穿越机中使用较为广泛,因为我们需要在机架中间放置电控系统,使用这种布局能够最小化机体尺寸。从而减轻竞速无人机的重量,提高其速度优势。其特点是使用该机架的竞速无人机俯仰飞行转换较为灵敏、横滚飞行比较柔和,适合花式飞行,做杂技表演。

(3) Stretch X

其设计思想比较简单，就是将 Wide X 旋转 90 度就是 Stretch X。通常竞速会选用这种结构，在高速飞行时保证稳定性。使用该机架竞速无人机特点与 Wide X 的特点刚好相反，它的俯仰比较柔和，翻滚比较灵敏。适合在竞速方面使用。

(4) H

竞速无人机机架的 X 以外的另一种传统结构，现在出现的越来越少了其应用情况逐渐减少，主要原因是不太美观，也略显笨重。逐渐被 X 机架大家族淘汰

(5) HX

H 和 X 的结合体，这种结构使用较为普遍，即保持了 X 的紧凑，又提高了承载空间。结合了 H 型跟 X 型的两个优点。

(6) Hybrid 机架

该类竞速无人机机架前端两个电机间距比较小，后面两个电机间距比较大，可以叫做 Hybrid 机架。由于其一般为前窄后宽的造型，导致该竞速无人机在高速飞行时前后不同的横滚力矩可以让转向时的杆量减少，帮助该竞速无人机飞的更快。适合用于竞速。除了其形状不同可以分为许多机架以外，在其他方面竞速无人机机架也有很多类型。

(1) 一体式机架与分体组合式机架

其中一体式的机架在设计跟安装方面比较简单，不过缺点却很致命，一旦其中一个机臂损坏，就得必须要进行整体更换，费时费力费钱，并且其加工制造也会比较消耗材料。分体组合式机架则与一体式机架刚好相反，设计和安装会相对而言麻烦点，但是后续维护就会相对省事省钱。加工制造上也会比较省料。

(2) 电池上置与电池下置

一般情况下花式飞行的竞速无人机的电池都上置，竞速飞行的竞速无人机的电池都下置。

(3) 安装孔的位置与大小

机架上要安装飞塔、摄像头、相机等等一系列装备，所以需要要打安装孔。对于飞塔，通常是 30.5×30.5 ， 20×20 或 16×16 。不同的机架大小就会选择不同的尺寸，有些大的机架则会保留多种安装孔。为了以后的用途多样化。

国内竞速无人机虽然进入国内的时间不长，但其发展迅速，很多省市都成立了民间

的竞速无人机组织,并有很多人加入到这些组织之中。这些组织会不定时的举办相关比赛,比如四川的 FPV RACE 大奖赛、海南航模挑战赛等。同时,由于其入门门槛相对较低、观赏性及娱乐性较高,故竞速无人机项目也吸引了大批并没有航模操纵经历的业余玩家的加入。可见其受欢迎的程度之大。

国外在竞速无人机方面创下的世界纪录:

(1) NIMBUS,由俄罗斯圣彼得堡一家名为 Aerodyne NC 的创新公司研发生产的一款号称最坚硬的竞速无人机,采用蛋形结构机架,它的坚固得益于独特的蛋形机架结构和高强度的碳纤维材料,它的相机,电池等电子元件都放置在封闭的机体中,避免受到外部环境的影响。

(2) DRL Racer,由无人机竞速联盟产品总监与他的工程师团队携手打造,其总体机身重量仅有 80 克。它的飞行速度也创造了新的吉尼斯世界纪录。

(3) XJaguar,由知名智能运动无人机厂商 FLYPO 飞豹无人机推出,号称式最为暴力的竞速无人机,其之所以被称为最具暴力是由于其技术创新跟独特的结构设计,首创 8 合 1 塔式机构专利技术,高精度集成了 4 合 1 电调、新 F3 飞控、带 OSD 的图传,使飞机变得十分轻盈,省去许多复杂的布线,整体上看起来十分简洁。

参考文献

[1] 文程祥. 小型四旋翼固定翼复合式无人机设计及控制研究[D]. 长安大学. 2017.

[2] 昂海松. 微型无人机的设计原则和策略. 航空学报. 2015

[3] 贺欢. 世界微小型无人机最新发展应用概览. 中国安防. 2015

[4] Brenda M. Kulfan and John E. Bussoletti, "fundamental" parametric geometry representations for aircraft component shapes [J]. AIAA 2006-6948

[5] 李博. 小型尾座式可折叠翼无人机设计[D]. 北京交通大学. 2020

[6] 牟俊鑫. 纤维增强复合材料结构的纤维布局与拓扑优化[D]. 华中科技大学, 2019.

[7] 王旭. 某无人机结构静强度分析[D]. 南昌航空大学, 2013.

[8] 张月月. 轻型固定翼飞机机身结构优化及仿真分析[D]. 重庆理工大学. 2021

[9] 程建. 微型无人机动力电源系统研究[D]. 华北电力大学(北京). 2021

[10]徐成斌, 路明村, 张卫明. Solid Thinking Inspire 优化设计基础与工程应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.

[11]刘洋. AC500 飞机机身结构\座椅抗坠毁仿真分析[D]. 南京航空航天大学, 2009.

[12]方如金. 微小型无人侦察机总体结构气动特性分析[D]. 中北大学, 2014.

[13]闫晓军 黄大伟 王占学 马洪忠. 无人机动力[M]. 河北: 科学出版社, 2018

二、进度及预期结果

起止日期	主要内容	预期结果
2021. 10. 11 —2021. 11. 27	查找有关知识, 证明课题的可行性、查看相关文献, 查找有关课题知识。多看有关论文。	课题明确可行, 搜集足够多的相关资料
2021. 11. 28—2021. 12. 4	收集相关资料, 文献, 进行一次系统的归纳, 然后对收集的所有资料进行详细的分析, 根据老师发布的任务书, 完成开题报告。	归纳总结精细, 按时完成开题报告, 并根据老师的建议进行相应的修改
2021. 12. 4— 2022. 1. 31	初步设计出穿越机机架的结构, 并运用 Solid Works 进行建模。	设计出完整模型
2022. 2. 1— 2022. 2. 28	根据老师的建议完善模型并进行受力分析, 进行论文的初步草稿。	模型基本设计完毕, 受力分析完毕。

<p>2022. 3. 1-20 22. 3. 31</p> <p>2022. 4. 1-5. 20</p> <p>2022. 6. 1-20 22. 6. 25</p>	<p>论文的正式撰写,并在撰写过程中继续对模型的优化。</p> <p>完成答辩 PPT 的制作,准备进行最终答辩。</p> <p>最终答辩</p>	<p>论文基本完成,模型优化完成。</p> <p>PPT 制作完成,准备答辩。</p> <p>最终答辩</p>
<p>完成课题的 现有条件</p>	<p>计算机, Solid works 建模技术</p>	
<p>指导教师 意见</p>	<p>同意</p> <p>指导教师: <u>张健</u> <u>2022年3月5日</u></p>	
<p>开题答辩 小组意见</p>	<p>同意</p> <p>组 长: <u>张健</u> <u>2022年3月5日</u></p>	

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：

陈云飞

2022 年 6 月 6 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

随着科技的发展与时代的进步，无人机逐渐走进我们大众的生活，成为我们社会生活的必不可少的一部分。同时无人机也演变出许多个分支：军用无人机，植保无人机，拍摄用无人机等等。随着无人机的越来越普及，人们在娱乐方面也开发出了相应的无人机，比如，竞速无人机。竞速无人机出现的较晚但发展迅速，很快就形成了比较专业的生产工业体系跟专业的竞速无人机设计体系。当然虽然竞速无人机的发展迅速但是其设计制造上也存在着一些当前尚未解决的问题，比如新型材料的寻找，竞速无人机机架在飞行过程中发生的炸机事件等等问题。这些种种的问题都制约着竞速无人机的进一步向前发展。因此设计一种新型的竞速无人机结构有特别重要的研究价值。所以本文的目的就是设计一款新型的竞速无人机机架，来解决市场上现有的竞速无人机机架存在的问题。

本文的主要研究内容就是完成竞速无人机机架的设计，主要材料，电子元件的选择以及强度验证跟竞速无人机机架轻量化设计。在本篇文章中主要采用 **solid works** 建模软件进行初步的建模，然后再用拓扑优化软件进行优化。为了实现本文的最终目的，首先要确定其电子零件的主要参数跟机架的初始模型，根据大致重量与概念模型进行建模，在进行材料选择以及电子元件计算选择后对其强度进行受力分析，保证其整体外观形状与材料选择符合力学要求。然后应用拓扑优化软件进行拓扑优化。使最后的模型符合设计要求。

关键词：竞速无人机机架；solid works 建模技术；拓扑优化理论；力学分析。

ABSTRACT

With the development of science and technology and the progress of The Times, UVA has gradually entered our public life and become an essential part of our social life. At the same time, UAV has evolved into many branches: military UAV, plant protection UAV, photography UAV, etc. With the increasing popularity of UVA, people have also developed corresponding UAV for entertainment, which is the protagonist of my graduation design: racing UAV. Racing UAV appeared late but developed rapidly, and soon formed a relatively professional production industrial system and professional racing UAV design system. Of course, although the development of racing UAV is rapid, there are still some unresolved problems in its design and manufacturing, such as the search for new materials, and the crash of racing UAV frame in flight is easy to happen. All these problems restrict the further development of racing UAV. Therefore, the design of a new type of racing UAV structure has particularly important research value. Therefore, the topic of this paper is to design a new racing UAV frame. To solve the existing racing UAV frame on the market may exist: the frame in the flight process of a certain probability of explosion events. In this paper, solid Works is used to model the racing UAV and improve its overall structure. Finally, on the basis of ensuring its flight speed in the air, the structural strength of the racing UAV frame is relatively strengthened. Enhance its overall stability. Reduce the degree of damage caused by collisions in the course of its flight.

The main research content of this paper is to complete the design of racing UAV frame, the selection of main materials, electronic components and strength verification and lightweight design of racing UAV frame. In this paper, we mainly use solid Works modeling software for preliminary modeling, and then use topology optimization software for optimization. In order to achieve the ultimate goal of this article, the first to determine the main parameters of electronic components and frame of the initial model, according to the weight and the conceptual model to model, roughly in the selection of materials and electronic components after selecting calculation on the strength of stress analysis, to ensure its overall appearance shape and material selection, conform to the requirements of the mechanics. Then topology optimization software is used to optimize topology. Make the final model meet the design requirements.

Key words: Racing drone rack; solid works; Topology optimization theory; Mechanical analysis.

目 录

第一章绪论.....	2
1.1 选题背景及其意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 研究的主要目的和内容.....	4
第二章 竞速无人机总体方案设计.....	6
2.1 竞速无人机设计思路.....	6
2.2 竞速无人机结构组成.....	6
2.3 无人机上主要元件的选择.....	7
2.4 本章小结.....	10
第三章 solid works 软件介绍及其模型分析.....	11
3.1 solid works 软件介绍.....	11
3.2 模型总体设计.....	11
3.3 上下壁板设计及其分析.....	12
3.4 强框的设计及其分析.....	13
3.5 两臂板之间的连接螺丝.....	14
3.6 本章小结.....	15
第四章初始模型应力分析.....	16
4.1 无人机重心计算.....	16
4.2 起飞时应力分析.....	16
4.3 本章小结.....	18
第五章 加强框的拓扑优化.....	19
5.1 拓扑优化的优点及其原理.....	19
5.2 拓扑优化过程及其得到的方案.....	19
5.3 应力分析.....	21
5.4 本章小结.....	21
参考文献.....	22
致谢.....	23

第一章绪论

1.1 选题背景及其意义

无人机，意思就是无人驾驶的飞机或者飞行器。无人机是科技的进步与发展的产物，培养一个飞行员的费用比一架飞机费用要高得多，越来越多的空难的发生使得无人驾驶逐渐走向主流。很久以前人们就设想过飞机的无人驾驶。随着科技的进步这种设想变为了现实。同时随着科技的发展无人机不再是单纯的无人驾驶而是分为大型和小型无人机两种机型的无人机家庭。大型无人机一般在生活中不多常见多为军方和政府使用，而小型无人机则逐步进入大众的日常生活。小微型无人机具有远程遥控、可以携带多种设备（摄像头，农药喷洒器，红外摄像仪等等）的多种功能，同时根据任务的不同携带不同的设备并且可以进行反复的使用。小型无人机主要由操作者、信号接收装置和无人机本体这几个部分组合而成。根据小型无人机执行任务的不同，可以将其分为不同的类型：竞速无人机，植保机等等。

竞速无人机是无人机大家庭中的一个与众不同的无人机，是一款竞速类，续航时间较短的小型无人机，这种无人机的操作视角一般为第一视角，它的操纵感受更像是一种电子游戏，不仅能带给操纵者身临其境的感官体验，同时也让竞速无人机具有了与传统无人机不一样的新奇玩法。竞速无人机玩家们可以按照自己的喜好用自己喜欢的方式进行对自己竞速无人机的组装。随着无人机技术的发展，竞速无人机的逐渐普及，竞速无人机的专业玩家和业余兴趣爱好者们渐渐的对竞速无人机的设备提出更高的要求。不论无人机还是竞速无人机，安全性仍然是一个难点，由于竞速无人机在飞行状态中需要产生很强的动力来满足其速度要求，所以其结构相对来说比较简单防护设施不到位，在飞行过程中发生碰撞机架就会产生断裂。导致整个竞速无人机发生坠落导致竞速无人机被摧毁，造成经济上损失。竞速无人机坠毁也可能带来一系列的事故的发生，其中有很多不可控的事情发生，会造成很多意想不到的后果。比如机架断裂以后机翼就会暴露在空气中，机翼的危险指数非常之高。机翼就是螺旋桨，螺旋桨在飞行状态下始终保持一个高速旋转的状态，高速旋转的螺旋桨所产生的危害是非常大的，而竞速无人机的转速更是高于普通的无人机，能达到惊人的 20000 转/分钟，进行百公里超高速飞行的同时，如果遇到一些障碍物，就会如同切纸片一样将其切开，能够轻轻松松的砍断树枝、切开猪肉、砸碎玻璃等等，所以一个坚固的竞速无人机机架显得格外的重要。

1.2 国内外研究现状

通过调查研究发现国内外研究情况处于同一水平，当今时代是一个开放的时

代，许多民用技术都得到了共享，下面是一些无人机机架的相关知识，为下面的技术内容做一定的铺垫。

无人机机架的大小一般由两个距离最远的电机来决定，竞速无人机也是如此。其中对于四轴竞速无人机就是对角线上的两个电机的距离，机架的计量单位都是毫米。其中在竞速无人机材料使用上绝大多数的机架都是选用碳纤维，机架材料选用碳纤维的原因是因为碳纤维的优点是强度高，重量轻。十分符合竞速无人机对速度的要求和强度的要求。竞速无人机机架的材料的使用情况通常是机臂部分会稍微的厚一点，比如 4mm，其他部分可以相对而言会适当薄一些，比如 1.5-2mm。当然除了碳纤维，有时还会用到铝管、3D 打印件（TPU）等等材料，用来连接机架或固定相机、天线等从而加强竞速无人机的总体强度。机架按照机臂的个数可以分为 3 轴、4 轴、6 轴、8 轴等等，竞速无人机使用最多的就是 4 轴。4 轴的相对来说更适合竞速无人机。

国外的几个顶尖领域：

(1) NIMBUS，如图 1-1 由俄罗斯圣彼得堡一家名为 Aerodyne NC 的创新公司研发生产的一款号称最坚硬的竞速无人机，采用蛋形结构机架，它的坚固得益于独特的蛋形机架结构和高强度的碳纤维材料，它的相机，电池等电子元件都放置在封闭的机体中，避免受到外部环境的影响。



图 1-1NIMBUS 无人机

(2) DRL Racer，如图 1-2 由无人机竞速联盟产品总监与他的工程师团队携手打造，其总体机身重量仅有 80 克。它的飞行速度也创造了新的吉尼斯世界纪录。



图 1-2DRL Racer 无人机

(3) X Jaguar, 由知名智能运动无人机厂商 FLYPO 飞豹无人机推出, 号称式最为暴力的竞速无人机, 其之所以被称为最具暴力是由于其技术创新和独特的结构设计, 首创 8 合 1 塔式机构专利技术, 高精度集成了 4 合 1 电调、新 F3 飞控、带 OSD 的图传, 使飞机变得十分轻盈, 省去许多复杂的布线, 整体上看起来十分简洁。如下图所示:



图 1-3 X Jaguar 无人机

1.3 研究的主要目的和内容

研究目的: 减轻竞速无人机重量提升竞速无人机强度。

研究内容: (1) 完成竞速无人机机架轻量化设计:

确定其无人机机架所要使用的材料, 计算电子元件的主要选型, 运用拓扑优化技术在已经初步确定的大致外形上进行轻量化,

(2) 完成竞速无人机机架的设计:

大量查阅相关资料, 观察市面上的无人机结构设计。整理其优缺点, 将其进行综合运用构想出新型的无人机机构。运用 solid works 软件画出其大概的粗略的模型在进行拓扑优化。

(3) 完成竞速无人机强度验证:

运用相关软件进行受力分析, 进行强度测试, 确保其机架的可行性。

第二章 竞速无人机总体方案设计

2.1 竞速无人机设计思路

竞速无人机一般多为小型四翼无人机属于多旋翼无人机的一种。同时在设计竞速无人机的时候不仅要考虑上述的基本要求更要考虑到竞速无人机的飞行速度。竞速无人机，就是为了竞速而生，它在飞行过程中要求有极高的速度。当然由于其极高的速度所以导致其在飞行过程中一旦发生碰撞就会造成严重的后果。所以竞速无人机在设计过程中必须考虑其机体结构，机架结构以及所选材料。在满足其速度的同时也要考虑到其飞行过程中发生碰撞的情况，也要保证无人机的坚固程度。不能发生竞速无人机一次性使用的情况。

本文所设计的无人机尺寸为两电机间距为 260mm，竞速无人机机身长为 200mm，机身宽为 40mm。为增加强度，在该模型的外部加上一个加强框，为了减轻气体扰乱的情况，将四个机翼两两放在不同的平面上。

2.2 竞速无人机结构组成

竞速无人机的组成相较于其他种类无人机结构较为简单，组成基本与其他竞速无人机没有区别。其主要由电机，浆叶，FPV 相机，机架，电池，飞控和电调，图传模块，图传天线组成。竞速无人机主要有四个机臂，每个机臂上都装有一个电机跟浆叶。



其中电机和浆叶主要提供竞速无人机飞行所需要的动力；
FPV 相机主要是进行无人机飞行时的画面拍摄；
机架则是竞速无人机的主要承载部件承载着竞速无人机的所有零部件；
电池提供飞行时所消耗的能源；
飞控与电调则是控制无人机的飞行方向和飞行速度，飞行姿态等；
图传模块则是竞速无人机把摄像头拍摄的图像转换成数字信号的中转处理

器；

图传天线是将图传模块转换的数字信号发射到操作者的设备仪器的发射器。

2.3 无人机上主要元件的选择

(1) 材料选择：市面上的竞速无人机机架的材料选择都已经形成标准，其主要使用碳纤维进行竞速无人机机架的制作。碳纤维具有密度小，强度高，它的比强度以及比模量是在现有工程材料是最高的，所以经常应用于航空航天等领域。本文中的碳纤维主要选择 T-300 碳纤维，这种碳纤维是市面上比较流行的一种碳纤维。价格便宜适用于初学者。

加强框材料本文主要选择铝合金，铝合金在航空航天领域也的使用也是较为频繁。这里本文选择的是 solid works 软件中的 7050-T73510 铝合金，该铝合金硬度跟强度极高，在航空航天领域的应用较为频繁。

(2) 连接用螺栓选择：经过查询得知，竞速无人机的螺丝选择多为 M3 螺钉，所以本文在建模时设计可以与 M3 螺钉与之匹配的孔。

(3) 电力推进系统选择：

整机质量评估：为了本文要设计的竞速无人机，必须选择一种适合的电力推动装置，首先要进行的就是最主要的质量评估，根据本文所选择的材料以及内部大致空间，机架质量 280 克，根据常用电池的质量估计电池质量大约为 200 克，以及行业内常用的各种螺旋桨、电动机、电调组合质量参数预估为 120 克，从而估计出该竞速无人机的大致重量为 600 克。电池可预估为 1300mA.h。

确定升力：计算该竞速无人机在起飞时需要的升力。根据力学公式，该竞速无人机起飞时要克服的自身的重力 $F=G\sin 90=6N$ ，因为模型设计有四个电机，所以平均分到每个螺旋桨上要产生的升力就是 1.5N。

螺旋桨设计：根据螺旋桨的选择标准以及所流行的螺旋桨种类，可预选 Flash-6042-3 型号的螺旋桨，其升力系数为 $C_F=0.088$ ，扭矩系数为 $C_M=0.036$ ，桨盘的直径是 $D=153.07\text{mm}$ ，由上可知螺旋桨需要产生的升力为 1.5N，设空气密度为 1.29Kg/m^3 ，由公式 2-2 可知，带入数据算得螺旋桨得转速为 $\Omega=9308\text{r/min}$ ，再由公式 2-3 可知，将数据代入计算可得 $M=0.0939\text{N}\cdot\text{m}$ 。

$$\Omega=60\sqrt{\frac{F}{C_F\rho D^4}} \quad (2-2)$$

$$M=C_M\rho\left(\frac{\Omega}{60}\right)^2 D^5 \quad (2-3)$$

电动机设计：电机尺寸和性能参数各异，并且直接决定了飞机的动力输出，如何选择合适的电机成为一个重大的难题。查询资料得知穿越机的无刷电机型号

主要由两部分构成，一是定子尺寸，如 2204 电机，定子直径 22mm，高 4mm；另一部分为 kV 值，其含义为每增加 1 伏特电压电机增加的转速，如 2300kV 电机每增加 1V 转速将增加 2300 转/分钟。根据相关数据可以得出，本文近似电动机空载电流 $I_{m0}=0.5A$ ，电动机的内阻同样也可以近似为 $R_m=0.101\Omega$ ，同时在 55% 的占空比下电动机得等效电压由公式 2-8 可知，设电池的电压 14.8V，由此可以得出等效电压为 $U_m=8.14v$ 。将电动机得预选得参数和上面由公式所计算的螺旋桨的参数带入公式 2-4、2-5、2-6、2-7 联立可以得出 $K_E=0.000729$ ， $K_M=0.00696$ ， $I_M=13.99A$ ， $K_V=1428$ 。由此计算可以得出所选电机的 K_V 值为 1428，等效工作电流为 13.99A。与现有电动机比较可以选择 K_V 值 1750 的电机如图 2-15 所示：



图 2-15 无刷电机

$$K_E = \frac{1}{K_V} \quad (2-4)$$

$$K_M = \frac{30}{\Pi} K_E \quad (2-5)$$

$$I_M = \frac{M}{K_M} + I_{M0} \quad (2-6)$$

$$U_M = K_E \Omega + R_m I_m \quad (2-7)$$

$$U_m \approx \sigma U_b \quad (2-8)$$

电池，电调选择：根据所选的电动机型号可以选择最大允许电流 30A，内阻 $R_b=0.01\Omega$ 的电调。由查阅资料可知，设该穿越机在空中悬停时间不低于 15min，再此情况下该穿越机其余机载设备电流消耗 $I_{other}=1A$ ，电池最小剩余容量为 0.2C。同时电池作为竞速无人机的动力提供在选择时要十分重视，查询相关资料可以得到，竞速无人机的无人机电池基本全为锂电池，锂电池作为一种新型电池同时具

备重量较轻，动力强等双重特点，选择穿越机电电池首先要看的就是电池串数、电池容量、电池倍率数、电池电压、电池品牌这几个维度。4s 即为四片锂电池进行串联在一起。充电时都配有专门的充电器。

然后通过计算来进行电池的选型，由上可知无人机其余机载设备的电流消耗 $I_{other}=1A$ ，由公式 2-9 得 $I_e=7.6945A$ ，由公式 2.9-2.13 得，将所求数据以及所选数据带入公式 2-10、2-11、2-12、2-13、2-14 可以得到 $U_{e0}=9.25$ ， $U_e=4.52$ ， $I_b=24A$ ，所需要的电池容量约为 $1250mA\cdot h$ ，根据实际情况选择 $1300 mA\cdot h$ 。如下图 2-16 所选：



图 2-16 电池

$$I_e = \sigma I_m \quad (2-9)$$

$$U_{e0} = U_m + I_m R_e \quad (2-10)$$

$$\sigma = \frac{U_{e0}}{U_E} \approx \frac{U_{e0}}{U_b} \quad (2-11)$$

$$I_b = n3I_e + I_{other} \quad (2-12)$$

$$U_e = U_b - I_b R_b \quad (2-13)$$

$$t_b = \frac{C_b - C_{\min}}{I_b} \times \frac{60}{100} \quad (2-14)$$

表 2-1 无人机主要参数

器件名称	器件选择
上下壁板	T-300 碳纤维
加强框	铝合金
连接螺丝	M3 型号螺丝，螺母
电动机	k v 值 1750 的电机
电调	最大允许电流 30A，内阻 0.1 Ω
电池	1300 m A·h 电池

2.4 本章小结

通过本章的计算与论证选择，确定了竞速无人机机架的主要尺寸，得出了该竞速无人机所用的主要零件，确定了该竞速无人机使用的材料以及所要选择的主要电子零件的参数，由此参数可以在市场上选择合适的电子器件，经过计算所得参数与一开始假设参数基本一致，计算出的主要参数如下表所示：

第三章 solid works 软件介绍及其模型分析

3.1 solid works 软件介绍

Solidworks2018 中文版是一款十分好用的三维 CAD 系统，它依靠其使用的 Windows OLE 技术、直观式设计技术、先进的 para solid 内核(由剑桥提供)等等技术以及良好的与第三方软件的集成技术而成为全球装机量巨大且十分好用 8 的软件。Solid works 有功能强大、易学易用和技术创新三大特点，这使得 Solid works 成为领先的、主流的三维 CAD 软件。Solid Works 能够提供不同的设计方案、减少设计过程中的错误以及提高产品质量。Solid Works 不仅提供如此强大的功能，而且对每个工程师和设计者来说,操作简单方便、易学易用。同时 SolidWorks2018 版本也是一款十分好用且专业的 CAM、CAE 分析跟建模软件，其主要功能包含了 3D 设计、产品仿真、PDM 产品数据管理、可持续化设计等多种功能，可以满足不同用户进行 CAD 设计和制图还有三维建模的需要，该软件被广泛应用于零件设计、装配设计和工程图等多个方面，主要用于提供多种不同的魔性设计方案、减少魔性设计过程中可能出现的错误以及最大限度的提高要设计的产品的质量。对于只要熟悉微软的 Windows 系统的用户,基本上就可以用 Solid Works 来进行建模与设计工作了。同时 Solid Works 独有的拖拽功能使用户在较短的时间内完成大型装配设计。Solid Works 资源管理器是与 Windows 资源管理器一样的 CAD 文件管理器，用它可以方便地管理 CAD 文件。本文中我们主要使用 Solid Works 中的建模功能与静应力分析功能与拓扑优化功能，从而达到目的设计出一款新型竞速无人机机架。

3.2 模型总体设计

通常来说竞速无人机的机壁一般都位于同一机身壁板上，即位于同一平面内，这是现有的大部分竞速无人机所常用的一种形式。但是本文中所设计的竞速无人机机臂并不在同一平面内，而是设计成如下图所示的前两个机臂位于下面壁板，后面两个机臂位于上面壁板。设计成这样主要目的是减小气流干扰。当无人机向前飞行时，无人机会向前倾斜，前面两个旋翼的气流会对后面气流产生一定的气流干扰。并且上下壁板为对称结构，可以降低一定的加工成本。

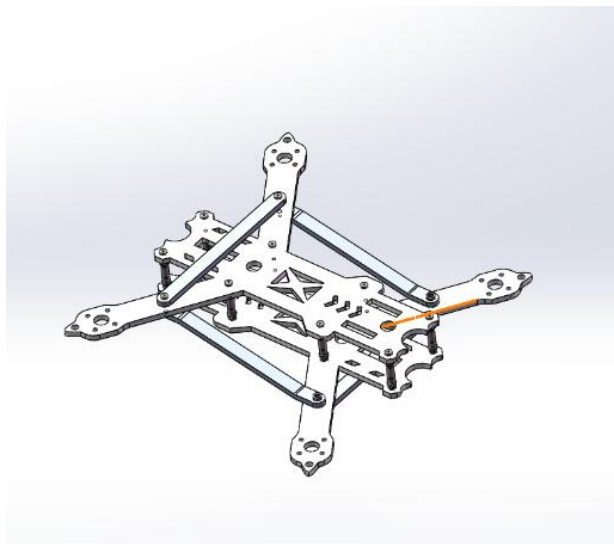


图 3-1 整体结构图

3.3 上下壁板设计及其分析

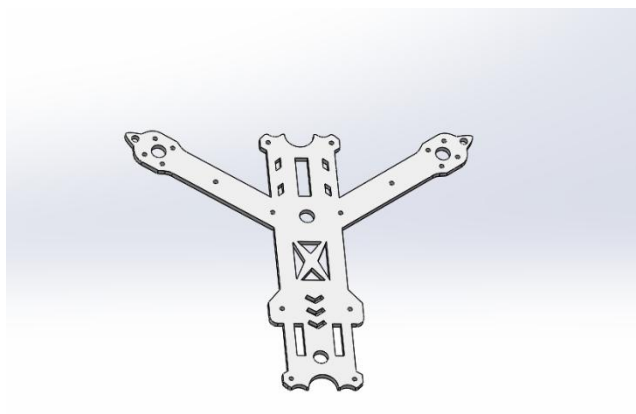


图 3-2 上壁板

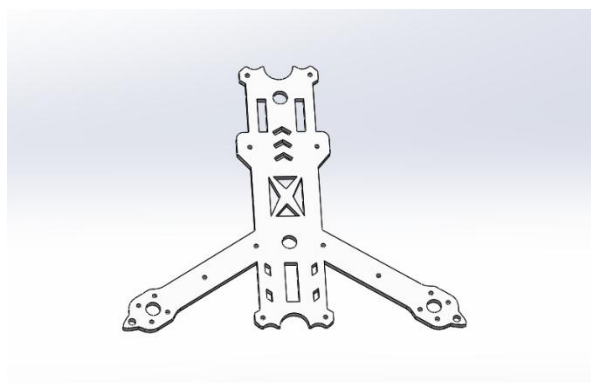


图 3-3 下壁板

目前常见的竞速无人机，机臂与机身是如图所示每个壁板上都有两个机臂，这是设计的一个特点之一。由于加强框的关系使得机架的整体重量增加，同时会

导致无人机的飞行速度得到一定的阻碍，所以采取这种设计结构来减少气流产生的阻力来保证竞速无人机的速度不受到影响。同时由于其每个壁板上均有两个机臂，相较于市面上的竞速无人机的四个机臂全部位于一个壁板上大大的减少了壁板所要承受的重力。增强了壁板的牢固程度，使得整个壁板变得更加不容易断裂。

另外一个设计就是本文中的机臂与上下壁板之间是一体的，现有的大多数竞速无人机的机臂与机身壁板的连接都是用螺丝进行连接，机臂与壁板的连接处会产生很大的应力集中，然而在无人机的高速飞行中，这种巨大的应力集中往往是致命的，很容易会造成炸机事件，本文对其进行了改进，使其成为了一体化的结构。这种一体化的结构可以很大的提升机架的整体的坚固程度。防止其在发生碰撞时导致机臂与臂板之间的应力过于集中从而会导致其发生炸机事件，从而造成更为严重的结果与巨大的经济损失。

3.4 强框的设计及其分析

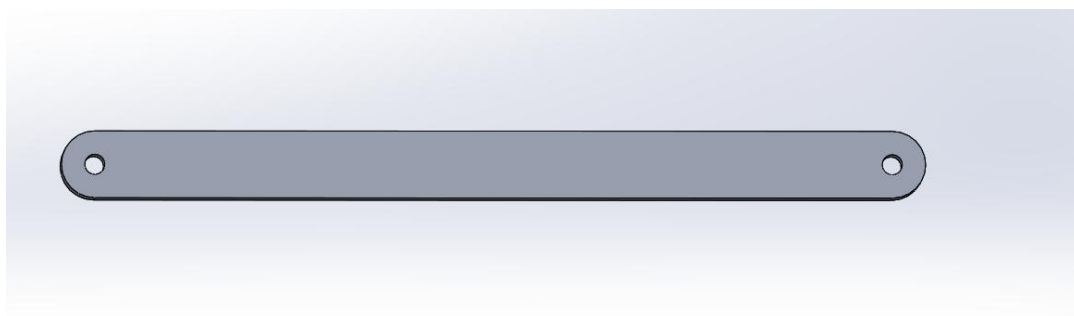


图 3-4 横向加强框

之所以设计该加强框主要是为了加强整个无人机机架的强度，查阅资料可知，世界上最牢固的形状就是三角形。本文在同于一平面的两个机臂上加上一个横向加强框使其成为最坚固的三角形。从而可以使其在发生碰撞时机臂的强度最高，减小其发生断裂的概率。



图 3-5 横向加强框

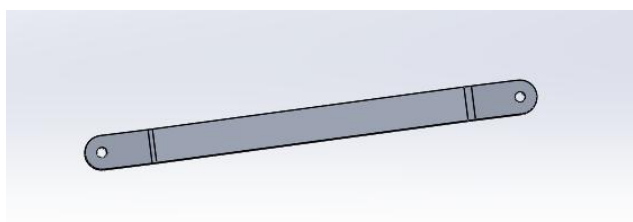


图 3-6 侧翼加强框

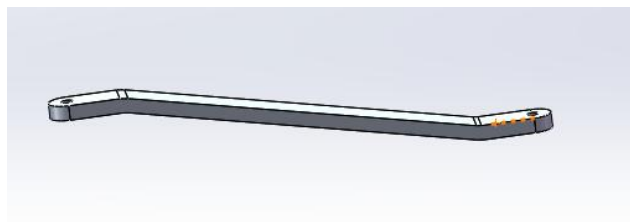


图 3-7 侧翼加强框

由于本文设计的四个机臂不在一个平面上，所以无人机在飞行时会造成上两个机臂单独发生碰撞的情况，整体显得不是特别牢固。同时也考虑到无人机在空中飞行时假如发生突然的动力丢失或者与障碍物发生碰撞情况，导致无人机在跌落时侧面着地，发生这种情况后由于设计的四个机臂不在一个平面上，导致其坠落产生的重力会分布不均匀，导致机身中间产生裂缝，同时为了保护机身内部的电子元件，在两个不同平面的机臂之间设计一个斜向的加强框来增强结构的稳定性。如下图 3-8 所示。

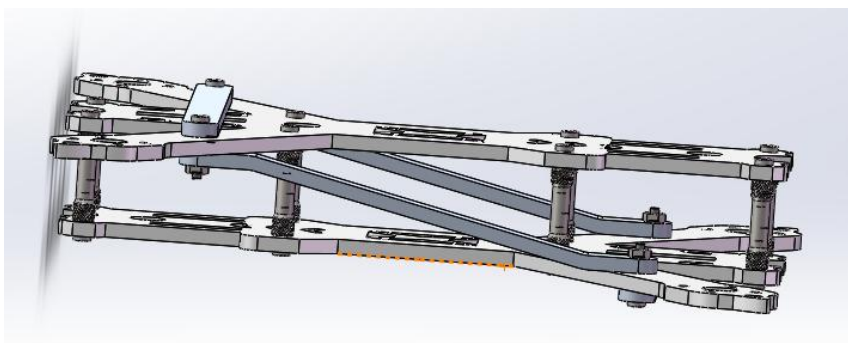


图 3-8 初始模型

3.5 两臂板之间的连接螺丝

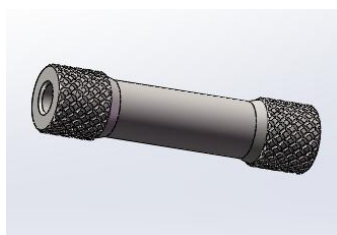


图 3-9 双头螺帽



图 3-10 螺丝



图 3-11 螺丝

如图所示，两个臂板之间的连接由螺丝与双头螺帽连接而成。同时为了保护螺丝防止其被腐蚀从而导致螺钉的螺纹不清楚和容易断裂，从而对其设置一个螺套进行相应的保护措施。根据现有竞速无人机的螺丝选型标准，所用螺钉均为平头螺钉。设计如上所示：

3.6 本章小结

本章利用 solid works 进行初始模型的建模，找出现有竞速无人机机架存在的主要问题，并在建模时进行修改与注意，对主要设计思路进行相应的解释，尽可能按照主要设计构想完成建模。对每个零件的设计思路与所存在的问题进行了一个阐述，对主要设计思路进行相应的解释，完成了对初始模型的创建。

第四章初始模型应力分析

4.1 无人机重心计算

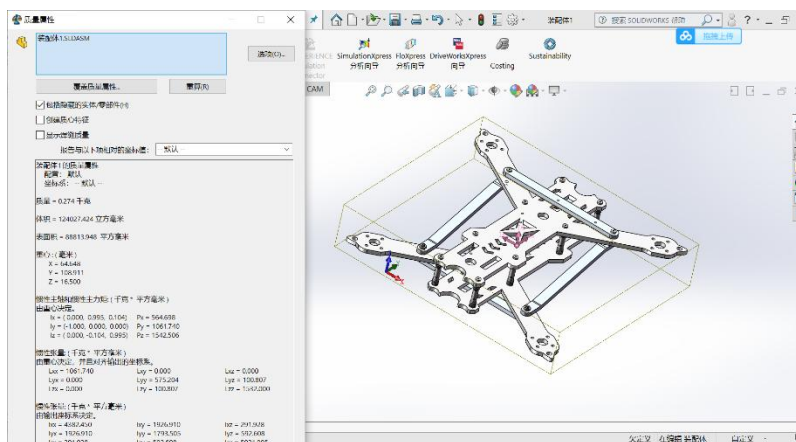


图 4-1 重心计算

无人机的重心通过软件模型进行测算如上图所示,如上所示该竞速无人机机架的实际质量为 274 克,所以我们预估的整机质量为 600 克。重心如上图所示,基本参数如上图 4-1 所示,重心大概位于壁板:“X”缺口内部。

其中所选用的碳纤维的各种参数:中泊松比: 0.28, 质量密度: 1760kg/m^3 , 弹性模量: 216N/m^2 ; 中抗剪模量: 110N/m^2 。

所使用铝合金的各种参数:弹性模量: $7.2\text{e}+10$: 中泊松比: 0.33: 质量密度: 2830kg/m^3 : 中抗剪模量: $2.69\text{e}+10$ 。

4.2 起飞时应力分析

软件设计机架预计 274 克,通过计算选择内部搭载设备,可以得出该款竞速无人机大致重量是 600 克,因此每个机架的机臂上搭载的电机要产生 1.5N 的力,要承担的力也是 1.5N。因为在静应力分析的网络生成中由于电脑配置等硬性问题的,本文只能将模型中的螺丝与螺母进行压缩来进行静应力分析。由于模型的装配关系去掉螺丝螺母后的静应力分析并不会影响结果。将模型进行压缩后得到的图形如图 4-3 所示:

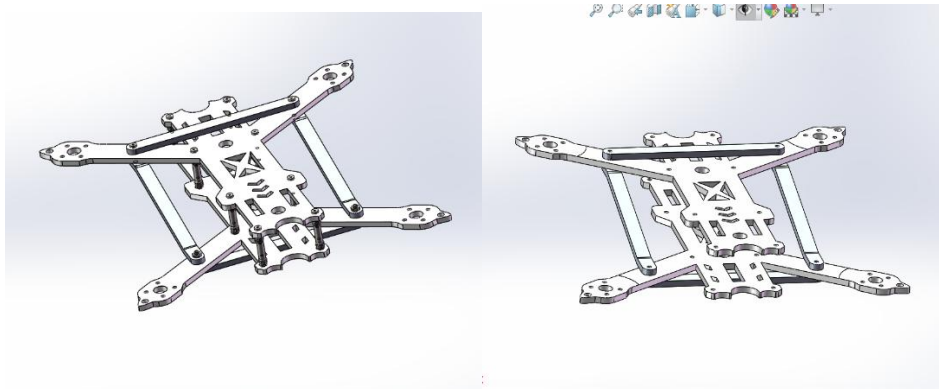


图 4-2 初始模型图

4-3 应力分析模型

其中左边为原图，右边为静应力分析时所改变的模型，左右两边静应力分析时的结果都是一样的。

由计算可知每个机臂所受的力为 1.5N，其受力如图 4-4 所示，我们使每个机臂均受到向上的 1.5N 的力。

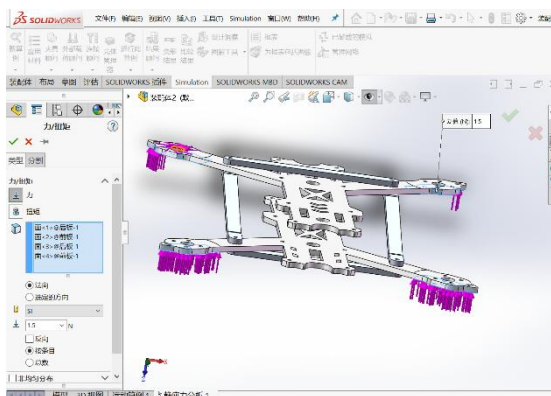


图 4-4 应力分析

然后使其生成网格并对其进行案例计算可以得出如图 4-5 所示的静应力分析图，并在图中标出最大应力： $8.4953e+6\text{pa}$ 。

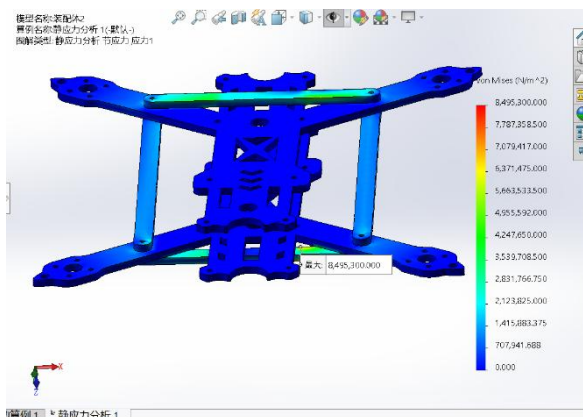


图 4-5 分析结果图

网上查阅资料以及该软件对所选材料的最大屈服应力，其中所选碳纤维 T-300 的最大屈服应力为 3000MPa - 3600MPa ，所选铝合金的最大屈服应力为

4.35e+8pa,由于其装配体起飞时所受的虽大应力低于两个所选材料的最大屈服应力。所以可以得出该竞速无人机机架的初始模型在起飞情况下的最大应力在材料的允许范围之内,所以该竞速无人机机架的初始模型在起飞情况下满足设计要求。

4.3 本章小结

本章对初始模型进行静应力分析,来验证初始模型是否满足起飞要求,通过对特定部位进行力的载荷放置,确定其约束条件,设定其不同零件的不同材料。随后通过电脑计算可以得出最大屈服应力,通过与所用材料的最大屈服应力比较,可以得出模型最大屈服应力远小于所选材料的最大屈服应力,从而可以得出所选材料满足模型的设计要求。即初始模型设计及其选材均达到初始目的。

第五章 加强框的拓扑优化

5.1 拓扑优化的优点及其原理

拓扑优化技术是现今社会上设计零件常用的一种技术，拓扑优化是一种依据自己设定的负载情况、约束条件和性能指标，在给定的区域内以及自己所必须保留的材料部分明确的情况下对材料分布进行优化的数学方法，是结构优化的一种。在所有参数都设定之后，对其进行优化，通过计算可以得出在不影响整体性能的情况下对材料进行削减。本文中我们主要使用的技术就是尽可能的减轻加强框的重量，在不影响其性能的情况下对其进行优化，从而得出质量最轻，即受阻力最小的一种情况。从而使最后的模型所花费的费用最低，性能最好的一种方案。

5.2 拓扑优化过程及其得到的方案

应用 solid works 软件所配备的拓扑优化技术进行夹具等一系列操作，根据自己的实际需要以及现有的实际情况进行相关零件的优化。在本文中主要对四个加强框来进行优化，因为在制作上下壁板时已经对其进行了减重孔设计，所以在此只对四个加强框来进行一个相关的优化。因为四个加强框中两个横向加强框与两个斜向的加强框的功能与形状是一样的，所以对此分成两个部分进行计算。

(1) 横向加强框的优化：首先在进行优化前要确定该零件要必须保留的区域，

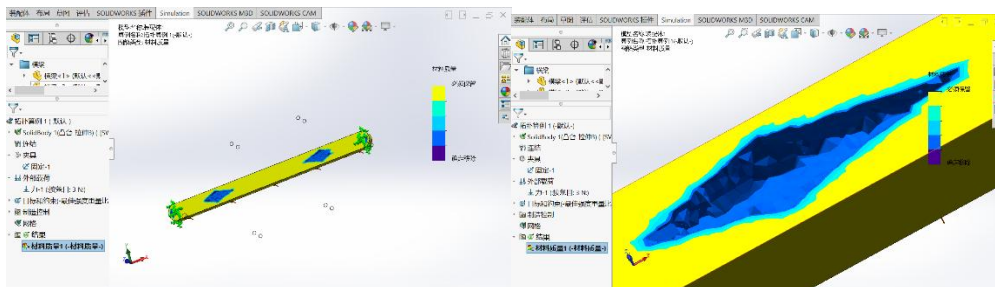


图 5-1 整体图

图 5-2 细节图

如图 5-1, 5-2 所示要使整个加强框受 3N 的力，经过电脑软件的计算可以得出，其中在上述图中，黄色为必须保留区域，紫色或者已经去掉的部分是可以去除的部分，也就是本文所说的优化部分。由黄到紫代表着可以去除的必要性。由上述图可知，在横向加强框中可以去除两个近似菱形的洞，以及在其两端可以挖两个小洞从而达到优化的效果。之后在其软件上进行模型重构。

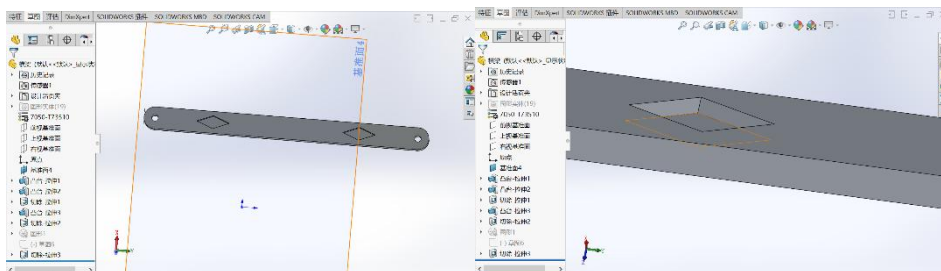


图 5-3 修改后整体图

图 5-4 修改后细节图

优化完之后的模型如图 5-3, 5-4 所示, 本文在原模型的基础上开了两个菱形的减重孔, 使其重量得以减轻且不影响其主要性能。

(2) 斜向加强框的优化: 在零件上确定要保留的区域, 并加上载荷。得出优化建议如图 5-5:

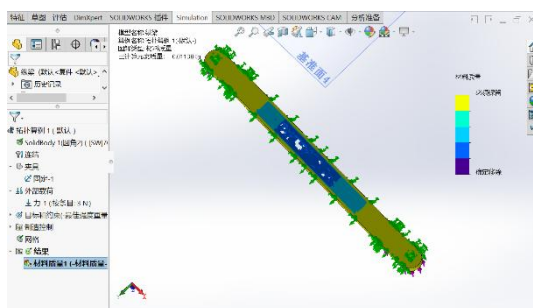


图 5-5 整体图

紧接着对其进行模型重建, 将深蓝色部分全部去除, 并进行建模得:

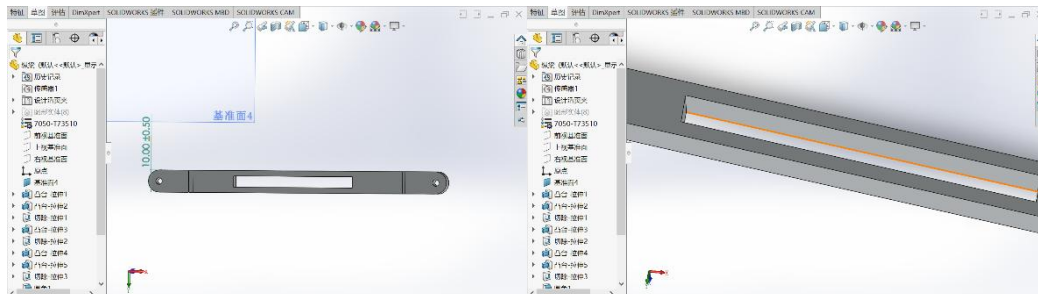


图 5-6 修改后整体图

图 5-7 修改后细节图

如图所示 5-6, 5-7 根据所的数据对模型进行重建, 将中间部位做一个减重控。

至此四个加强框全部优化完成, 经分析得优化前得四个加强框总重为: 57.94 克, 优化后得到总重为 51.04 克, 总减重 6.9 克, 总减重 11.9%。最后将其装配到一起可以得到最后得完整模型如图 5-8:

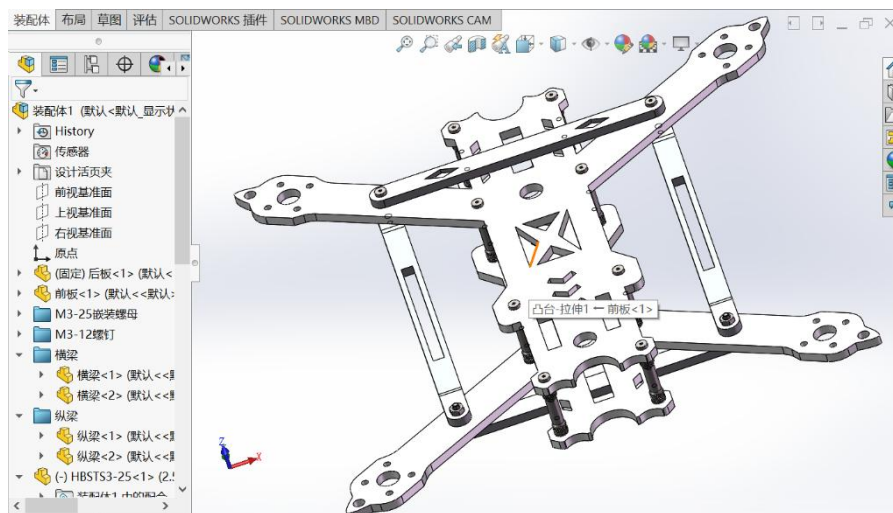


图 5-8 最终模型图

至此该模型全部优化完成，得到所需要的最终模型。

5.3 应力分析

模型优化完成以后对优化后的模型进行应力分析来测试强度是否符合要求，经过 solid works 中的应力分析可以得到如下所示结果：

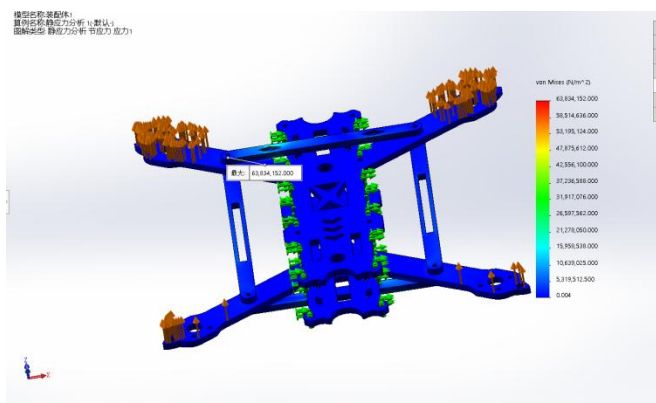


图 5-9 应力分析图

如图所示得出最大应力为 $6.3834152 \times 10^6 \text{ Pa}$ ，由上可知远小于所选材料的最大屈服应力，可得强度符合设计标准达到设计目的。

5.4 本章小结

本章为最后一章，主要对初始模型进行优化，通过 solid works 软件的拓扑优化功能，确定约束条件、受力载荷、确定保留区域，最后通过软件分析得到最后的优化结果，无人机机架总减重 6.9 克，最后根据颜色划分，通过软件操作对初始模型进行加强框的重建，重建完成后将重建后的加强框重新装配到模型上。得到最终的效果图。

参考文献

- [1] 文程祥. 小型四旋翼固定翼复合式无人机设计及控制研究[D]. 长安大学. 2017.
- [2] 昂海松. 微型无人机的设计原则和策略. 航空学报. 2015.
- [3] 贺欢. 世界微小型无人机最新发展应用概览. 中国安防. 2015.
- [4] Brenda M. Kulfanand John E. Bussoletti, fundamental parametric geometry representations for aircraft component shapes[J]. AIAA2006-6948
- [5] 李博. 小型尾座式可折叠翼无人机设计[D]. 北京交通大学. 2020.
- [6] 牟俊鑫. 纤维增强复合材料结构的纤维布局与拓扑优化[D]. 华中科技大学, 2019.
- [7] 王旭. 某无人机结构静强度分析[D]. 南昌航空大学, 2013.
- [8] 张月月. 轻型固定翼飞机机身结构优化及仿真分析[D]. 重庆理工大学. 2021.
- [9] 程建. 微型无人机动力电源系统研究[D]. 华北电力大学（北京）. 2021
- [10] 徐成斌, 路明村, 张卫明. Solid Thinking Inspire 优化设计基础与工程应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [11] 刘洋. AC500 飞机机身结构\座椅抗坠毁仿真分析[D]. 南京航空航天大学, 2009.
- [12] 方如金. 微小型无人侦察机总体结构气动特性分析[D]. 中北大学, 2014.
- [13] 闫晓军 黄大伟 王占学 马洪忠. 无人机动力[M]. 河北: 科学出版社, 2018.

致谢

行文至此，不由感慨万千。时光荏苒，白驹过隙，转眼之间四年的本科生活已接近尾声，回首过去，思绪万千。这几年来既有成功的喜悦也有失败的懊恼。有太多难忘的人与事。首先，我要由衷的感谢我的导师张健老师对我不停的教诲与悉心关怀。在我最后的毕业设计过程中，从一开始的选题、模型设计、建模、选材、分析再到最后的论文的编写都包含着老师得汗水与心血。在毕业设计一开始阶段由于准备考研所以整体进度比较慢，但是老师很快给我提出了解决办法使我很快的赶上了进度。并不断地给我解决在后续工作中所遇到的问题，同时他严谨的教育风格与做事态度也加强了我在备考研究生的日子里得学习动力。

然后就是对我无私奉献的家人们，有了他们毫无保留地支持，与无条件的信任才使我能没有后顾之忧的完成我的学业，让我拥有愉快的大学生活。有了他们我才能在我的求学之路上大跨步前进。

最后就是大学生涯遇到的所有老师同学。老师们对我的全心全意的教导，使我的各个方面都得到了提升。让我每天以最好的精神面貌迎接未知的挑战。

至此，本科生涯画上完美的句号，希望所有人都能走向更美好的未来。