



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

本科生毕业设计

飞行摩托结构设计与分析

Structural Design and Analysis of Flying Motorcycle

姓 名 贺继

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

飞行摩托结构设计与分析

Structural Design and Analysis of Flying Motorcycle

姓 名 贺继

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	航空航天大学		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	飞行摩托结构设计与分析						
题目类型	自拟	题目来源	其他项目				
课题来源、背景及意义	<p>随着中国特色社会主义进入新时代,人们的物质性生活水平得到明显的提高,越来越多的人需要更加私人的空间,这就使得私人交通工具越来越受到欢迎。但是随着私人交通工具的增多,各种各样的问题也随之而来,比如交通拥堵,环境污染等等,这就导致急需一种新型的交通工具来取代传统的地面交通,飞行摩托自然而然地走进了大众视野。</p> <p>飞行摩托的用途十分广泛,可供商用,也可供军用,尤其是在应对紧急情况方面有着独特的优势,因此可在这些领域应用广泛,例如警用、消防安全、军事巡逻、抢险救援、紧急投送、玩具航模和航拍等。飞行摩托具有比其他飞行器所不具有的优势,例如更快捷、更便利、更灵活、更环保和实用性更强等优点。但其缺点也十分明显,就目前情况来看,续航时间短是飞行摩托最突出的问题,驾驶安全是最重要的也是最难解决的问题,制造成本相比普通交通工具要高也是主要问题之一。</p> <p>虽说飞行摩托受到诸多因素的限制,但其优点也是十分明显,所以飞行摩托便是当前国内外研究的一个热点,是最有可能改变人类交通出行方式,因此受国内外的广泛关注。为设计出一款安全而又可靠的飞行摩托成为本次课题的研究的主要目的。</p>						

<p>任务及要求</p>	<p>该课题主要研究飞行摩托结构设计。结合参考文献所查阅适合飞行摩托结构设计,改进出合理的结构和外形设计。之后对其进行力学分析,分析其在静止状态、运动状态下的力学性能是否能够达到理想状态。</p> <p>工作内容</p> <p>(1) 完成飞行摩托整体设计</p> <p>通过对国内外文献资料的翻阅和查找,查询结构设计,根据需求选择和设计进行优化。</p> <p>(2) 利用 SolidWorks 软件对设计出来的飞行摩托进行三维绘图设计</p> <p>运用 SolidWorks 软件,完成建模,形成飞行摩托。</p> <p>(3) 运用 Simulation 对设计出来的飞行摩托进行有限元分析和受力分析</p>
<p>工作条件</p>	<p>安装有 SolidWorks 软件的电脑</p>
<p>知识与能力要求</p>	<p>(1) 有较好的自律性和自学能力;</p> <p>(2) 有熟练使用 SolidWorks 等绘图软件的能力</p>
<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： 飞行摩托结构设计与分析

学 院： 航空航天学院

专 业： 飞行器制造工程

学生姓名： 贺继

学 号： 20414040119

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

随着中国特色社会主义进入新时代，人们的物质性生活水平得到明显的提高，越来越多的人需要更加私人的空间，这就使得私人交通工具越来越受到欢迎。但是随着私人交通工具的增多，各种各样的问题也随之而来，比如交通拥堵，环境污染等等，这就导致急需一种新型的交通工具来取代传统的地面交通，飞行摩托自然而然地走进了大众视野。

飞行摩托的用途十分广泛，可供商用，也可供军用，尤其是在应对紧急情况方面有着独特的优势，因此可在这些领域应用广泛，例如警用、消防安全、军事巡逻、抢险救援、紧急投送、玩具航模和航拍等。飞行摩托具有比其他飞行器所不具有的优势，例如更快捷、更便利、更灵活、更环保和实用性更强等优点。但其缺点也十分明显，就目前情况来看，续航时间短是飞行摩托最突出的问题，驾驶安全是最重要的也是最难解决的问题，制造成本相比普通交通工具要高也是主要问题之一。

虽说飞行摩托受到诸多因素的限制，但其优点也是十分明显，所以飞行摩托便是当前国内外研究的一个热点，是最有可能改变人类交通出行方式，因此受国内外的广泛关注。为设计出一款安全而又可靠的飞行摩托成为本次课题的研究的主要目的。

2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

该课题主要研究飞行摩托结构设计。结合参考文献所查阅适合飞行摩托结构设计，改进出合理的结构和外形设计。之后对其进行力学分析，分析其在静止状态、运动状态下的力学性能是否能够达到理想状态。

工作内容

（1）完成飞行摩托整体设计

通过对国内外文献资料的翻阅和查找，查询结构设计，根据需求选择和设计进行优化。

（2）利用 SolidWorks 软件对设计出来的飞行摩托进行三维绘图设计

运用 SolidWorks 软件，完成建模，形成飞行摩托。

（3）运用 Simulation 对设计出来的飞行摩托进行有限元分析和受力分析

使用 SolidWorks 软件内的 simulation 插件，对所设计出的飞行摩托进行有限元分析，分析其设计的力学性能，以及检验设计是否能够达到理想的设计需求

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) 毕业设计（论文）一套

(2) SolidWorks 模型一份

4. 推荐参考资料：

- [1] 迪拜为警察配备飞行摩托[J].大数据时代,2017(05):72.
- [2] 高孔融.飞行摩托[J].航空知识,2013,(第 11 期).
- [3] 一平.灵便的单人飞行摩托[J].交通与运输,2013,(第 1 期).
- [4] 二哈.宝马联手乐高打造飞行概念摩托[J].摩托车信息,2017,(第 3 期).
- [5] 美美.美国新概念悬浮式摩托发布[J].摩托车信息,2017,(第 3 期).
- [6] 本刊编辑部.全球首款飞行摩托车开售 10 分钟变旋翼飞机[J].数字商业时代,2014,(第 8 期).
- [7] 张正.尾座式垂直起降无人机结构设计[D].
河南工业大学,2020.DOI:10.27791/d.cnki.ghegy.2020.000016.
- [8] 刘思敏.双发变距四旋翼无人机结构设计[D].
南京航空航天大学,2019.DOI:10.27239/d.cnki.gnhhu.2019.001079.
- [9] 王旭.某无人机结构静强度分析[D].南昌航空大学,2013.
- [10] Hardware-In-the-Loop Simulation with X-Plane of Attitude Control of a SUAV Exploring Atmospheric Conditions[J]. Adriano Bittar, Neusa Maria Franco Oliveira, Helosman Valente Figueiredo. Journal of Intelligent & Robotic Systems . 2014.
- [11] Uniform spherical grids via equal area projection from the cubeto the sphere[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics . 2011.
- [12] Aerospace Research; Researchers at Ecole de Technologie Superieure Have

毕 业 设 计 (论 文) 任 务 书

Reported New Data on Aerospace Research (A New Hybrid Control Methodology for a Morphing Aircraft Wing-tip Actuation Mechanism)[J]. Defense & Aerospace Week,2020.

[13]Natsuki TSUSHIMA,Masato TAMAYAMA. Recent researches on morphing aircraft Technologies in Japan and other countries[J]. Mechanical Engineering Reviews,2019,6(2).

[14]Binbin Yan,Yong Li,Pei Dai,Shuangxi Liu. Aerodynamic Analysis, Dynamic Modeling, And Control of a Morphing Aircraft[J]. Journal of Aerospace Engineering,2019,32(5).

[15]Star Trek:Ships of The Line. Doug Drexler,Margaret Clark. Pocket Books . 2006.

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： 飞行摩托结构设计与分析

学 院： 航空航天学院

专 业： 飞行器制造工程

学生姓名： 贺继

学 号： 20414040119

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）课题的目的意义

随着社会的发展和科技的进步，作为既有速度优势又可两栖使用的飞行摩托的应用空间非常之大。首先一方面是交通出行，飞行摩托能够成为主流交通工具之一，减轻现有的交通压力，为智慧交通和智慧城市发展贡献价值；其次一方面是灾时救援，灵活轻小的飞行摩托既可以实现对受灾人员的营救，也可以运送救援物资，给灾区带去保障。同时，飞行摩托还可以用于警备、娱乐休闲以及竞技等多种领域。在警备方面，飞行摩托可以成为警方的“标配座驾”，能够更加快速、便捷的进行巡逻、抓捕等工作；而在娱乐休闲方面，飞行摩托也带来了人们全新的飞行体验，完够胜任新一代娱乐工具的重任；除此之外，飞行摩托带来的极速激情也有望催生全新的竞技赛事。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。

目前国内外的飞行摩托主要分为两类，一类是以涡轮喷气发动机作为动力源，另一类是以多个旋翼转动产升的推力作为动力源的飞行器。为了改善飞行摩托的缺点，优化其性能，在研究国内外的飞行摩托的基础上，综合涡轮喷气式和旋翼式两者的优点进行该项目的研究。

（二）国内外研究情况及发展趋势

1.国外研究现状

Hoverbike 是澳大利亚悉尼的发明家克里斯多佛·马洛伊在他的车库里利用一套定制的碳纤维机身和一个 BMW 发动机制成的全球第一辆飞行摩托。这辆原型车加满一箱燃料能飞行多达 92 英里（148.06 公里），或者大约 45 分钟，它的售价有望超过 4.5 万英镑（7.19 万美元）。他把毕生积蓄全都投入到这个项目上，用了 2 年半时间才完成这个杰作。这辆被称作“Hoverbike”的未来派飞行摩托的飞行高度可达 1 万英尺（3048 米），时速超过 100 英里（160.93 公里），该车重 270 公斤，在研发阶段，马洛伊仅用绑带把它固定在地面上进行了超低飞行试验，以防它飞得太高。

2014 年 7 月，荷兰研制的全球首款飞行摩托车已正式发售，其仅需 10 分钟就可完成变形——从摩托车“变身”旋翼机。这款飞行摩托车名为“Pal-V One”，可在 10 分钟内完成从三轮摩托变身旋翼机的过程。Pal-V One 在地面或空中的最高时速都可达到 180 公里，起步加速到 70 公里时速只须 8 秒钟。当处于旋翼机状态时，Pal-V One 可在 1219 米低海拔空中巡航，但需 165 米长的起飞跑道。着陆时，Pal-V One 也需要 30 米长跑道。而在摩托车状态时，Pal-V One 的性能介于摩托车与赛车之间。Pal-V One 的油箱储存量为 102 升，满箱状态时的空中飞行与地面行驶距离分别为 354 公里与 1297 公里。一旦引擎停转，Pal-V One 的螺旋桨会自动折叠，并变回驾驶状态。Pal-V One 的制作材料为碳纤维、钛合金及铝合金，整体重量达 680 公斤。

美国陆军研究实验室已经于 2014 年与美国 SURVICE Engineering 公司和英国公司 Malloy Aeronautics 签订合同, 在 3 到 5 年内共同为美国军方开发一种飞行摩托车。SURVICE Engineering 公司首先将开发商业版飞行摩托车, 它可以载重 113 公斤, 成本约为 8 万美元。此后, 他们将依此研发军用版飞行摩托车。美国军方可能更喜欢载重量达到 181 公斤甚至 360 公斤的飞行摩托车, 那样可以允许士兵携带他们的武器和装备。

2.国内研究现状

由深圳哈威飞行科技有限公司研发的一款空陆两栖的微型个人飞行器, 从外观上看像一个加了底盘的摩托车, 尺寸也只有 2 米乘 1 米 8。这款空陆两栖的微型载人飞行器, 可以原地升降低空飞行。它可以自由选择手控或自动的飞行模式, 最大起飞重量 260kg, 有效载重达到 75kg。一次完整充电可实现陆地行驶 50km, 并能随时随地垂直起降, 低空飞行 10 分钟。

赵德力自造飞行摩托“筋斗云”——它的主体采用四轴八旋翼结构, 纯电动动力, 最大输出功率 80 千瓦。按照设计, 最大起飞重量 256 公斤、最高飞行高度 3000 米、最快飞行速度每秒 20 米。可由飞行员手动操控, 也可自动驾驶, 还能实现自主悬停、自动降落, 可通过航点规划实现自主飞行。

(三) 课题主要研究内容

该课题利用 solidworks 软件设计出飞行摩托结构, 研究飞行摩托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。结合参考文献查阅飞行摩托的飞行原理, 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. 飞行摩托结构设计; 2. 气动分析; 3. 运动学仿真。

(四) 参考文献

- [1]陈志杰,程鹏,江华.飞行机车未来治堵“神器”[N].南方4日报,2014-07-26(013).DOI:10.28597/n.cnki.nnfrb.2014.004734.
- [2]黄康.一种飞行摩托[P].四川省:CN113212086A,2021-08-06.
- [3]骑上摩托车,化身“飞行侠”[J].红领巾(成长),2020(06):1.
- [4]戴滨州.基于代理模型的摩托车车架轻量化研究[J].摩托车技术,2021(09):33-36.
- [5]李蕊娟.“中国第一飞行骑士”梦想成真[J].侨园,2019(07):42-44.
- [6]李秀芬,黄妙华.轻型车身材料在电动汽车上的应用与发展[J].汽车工艺与材料,2006(07):7-8.
- [7]二哈.宝马联手乐高打造飞行概念摩托[J].摩托车信息,2017(03):9.
- [8]莎莎.俄罗斯研制出飞行摩托车 Scorpion 1[J].摩托车信息,2016(08):9.
- [9]唐琳,秦睿安,孙立星.基于动力学仿真分析对摩托车车架结构的改进设计[J].小型内燃机与车辆技术,2020,49(06):75-78.

[10]更云.美国与英国合作开发军用“飞行摩托”[J].轻兵器,2015(18):54.

[11]陈炳贻.摩托车空气动力学研究进展[J].气动实验与测量控制,1992(04):10-17.

[12]覃柳叶,鲁誉,刘强,张增博.基于 HS-DOE 法的钢铝混合摩托车车架性能分析与优化[J].现代制造工程,2022(01):61-66+90.DOI:10.16731/j.cnki.1671-3133.2022.01.008.

[13]刘巧霞,黄利.重量分布偏差对全机重心影响[J].中国科技信息,2020(09):84-87.

[14]牛世兴.一种机翼与旋翼连体可变角度式飞行器结构设计[D].河北工业大学,2018.DOI:10.27105/d.cnki.ghbgu.2018.000062.

[15]池元成,张冶,郑小鹏,王长庆,宁学.飞行器气动外形的正交设计与分析[J].宇航总体技术,2022,6(01):50-54.

[16]田茂鹏,方文波.重心位置对飞机性能的影响分析[J].成都航空职业技术学院学报,2020,36(04):63-65+67.

[17]唐金元,王翠珍,王波,周洪霞.飞机重心位置的计算分析方法[J].航空计算技术,2016,46(03):72-74.

[18]Honda Motor Co. Ltd.; Patent Issued for Frame Structure For A Motorcycle (USPTO 10,780,937)[J]. Journal of Transportation,2020:

[19]Huang Jianzhe,Fu Xilin,Jing Zhongliang. Singular dynamics for morphing aircraft switching on the velocity boundary[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation,2021,95:

[20]Lelkov K S,Ulyanov D V,Surkov D A,Ushakov A N. Development of the mathematical model for the tilt-rotor aircraft[J]. Journal of Physics: Conference Series,2021,1925(1):


二、进度及预期结果

起止日期	主要内容	预期结果
2021.11.3—2021.12.3	收集资料，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。	完成开题报告与前期的模型建立。
完成课题的现有条件	具备良好的绘图能力，对机构的运动有较好的理解； 有较好的自律性和自学能力； 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：



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

在历史的长河里，都是由人力发展到机械，车辆的发展也不例外，也是先有人力车之后才是机车。摩托车设计背后的主导思想是使人们的旅途更轻松、出行更方便，以便人们娱乐消遣，并且是体验生活乐趣的交通工具。飞行器是一种由人类制造工具，它可以从地面起飞，并可以在人的控制下，使其在大气层内或大气层外飞行。飞行器通过空气的相对运动产生的空气动力完成升空飞行。而旋翼飞行器是飞行器中的一个分类，其中旋翼是提供升力的重要部件。在飞行过程中，旋翼会同时产生升力和拉力。不仅如此，通过控制旋翼转速还将会起到类似于固定翼飞机的副翼和升降舵的作用。

文中介绍的飞行摩托就是一种新型的旋翼飞行器，同时也是一款单人飞行器，它结合了摩托车和飞行器的各项优点所创造出来的。单人飞行器是指供给个人使用的轻型飞行装置，它由动力系统和控制系统等组成。在飞行器中，动力系统主要是各种发动机，它产生的推力足以使单人升空；操控系统顾名思义，它是用以人们操纵飞行姿态以完成飞行目标。伴随着科技的进步，城市交通的压力也与日俱增，未来的城市交通必然不会仅仅局限于地面，必然会向空中发展，飞行摩托的出现必然会满足城市空中交通的发展要求。为此我将结合澳大利亚悉尼的发明家克里斯多佛·马洛伊所设计名为 Hoverbike 的飞行摩托与法国 Ludovic Lazaret 公司设计的 La MotoVolante 两款飞行摩托来设计一款采用旋翼飞行方式的陆空两栖飞行摩托。

本文主要针对该飞行摩托的整体结构和旋翼组件进行设计与优化。我将参照现有的飞行摩托进行设计，同时将采用 solidworks 软件进行建模并对整体组件进行力学分析模拟，使之到达设计要求，为飞行摩托提供足够的升力。通过运用 solidworks 中的 Flow Simulation 流体分析插件对旋翼在一定转速下所产生的升力，同时还要考虑在升力达到设计要求时所选用材料结构强度是否可以满足飞行摩托飞行需要。

关键词：摩托车；飞行器；旋翼；飞行摩托；结构设计；有限元分析

ABSTRACT

In the long history, from human to machinery, the development of vehicles is no exception, is the rickshaw before the locomotive. The dominant idea behind the motorcycle design is to make people's journey easier, travel more convenient, so that people can entertain and relax, and is a means of transportation to experience the fun of life. The aircraft is a human-made tool that can take off from the ground and can be under human control to fly inside or outside the atmosphere. The vehicle flies through the aerodynamic force generated by the relative movement of the air. Rotorcraft is a classification of aircraft, in which the rotor is an important part to provide lift. During flight, the rotor produces both lift and pull. Not only that, by controlling the rotor speed will also act similar to the ailerons and elevators of fixed-wing aircraft.

The flying motorcycle introduced in this article is a new type of rotor aircraft, but also a single aircraft, which combines the advantages of motorcycle and aircraft created. Single-person aircraft refers to the light flight device provided for personal use, which is composed of power system and control system. In aircraft, the power system is mainly engines that generate enough thrust to lift the control system, as the name suggests, is used to fly to achieve targets. With the progress of science and technology, the pressure of urban traffic is also increasing day by day. The future urban traffic will not only be limited to the ground, but will inevitably develop into the air. The emergence of flying motorcycles will inevitably meet the development requirements of urban air traffic. To this end, I will design a land-air amphibious flying motorcycle designed by Sydney, Australia, and La MotoVolante designed by Ludovic Lazaret, France.

This paper mainly designs and optimizes the overall structure and rotor components of the flying motorcycle. I will design the existing flying motorcycle, and I will use solidworks software to model and simulate the mechanical analysis of the overall components to reach the design requirements and provide sufficient lift for the flying motorcycle. By using the Flow Simulation fluid plug-in in solidworks to analyze the lift generated by the rotor at a certain rotation speed, it should also consider whether the structural strength of the materials selected when the lift meets the design requirements can meet the needs of flying motorcycle.

Key words: Motorcycle; Aircraft; Rotor; Flying motorcycle; Architectural design; Finite element analysis

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题背景	1
1.2 课题意义	1
1.3 国内外研究现状	1
1.4 研究内容	3
第二章 飞行摩托的总体设计	4
2.1 总体设计	4
2.2 超短距离起飞	4
2.3 结构设计	5
第三章 摩托车设计理论	7
3.1 引言	7
3.2 车架	7
3.3 车轮	9
第四章 旋翼设计与分析	10
4.1 引言	10
4.2 旋翼设计	10
4.3 旋翼的特性	10
4.4 Flow Simulation 模拟分析	14
第五章 总结与展望	19
5.1 工作总结	19
5.2 不足与展望	19
参考文献	20
致谢	21

第一章 绪论

1.1 课题背景

伴随着社会的发展和科技的进步，堵车成为阻碍城市发展的又一个问题，汽车的逐年增多同时也造成了环境的污染，为了解决这一问题，未来的城市交通必然不会仅仅局限于地面，必然会向空中发展，必然会向清洁高效可持续发展方面发展。同时个人交通工具应用空间就变的非常之大。而旋翼和摩托车结构将直接影响飞行摩托的各项性能会越来越受到青睐，设计一款可载人的小型飞行器已经是必然趋势，作为陆空两栖使用的飞行摩托指标。

1.2 课题意义

对于生活在城市中的人们来说，堵车已经成为了人们的家常便饭，随着生产力的发展，人们都进入了快节奏，时间对于人们来说变得越来越宝贵，因此堵车的成本也会越来越高。堵车不但会造成巨大的经济损失，而且同样会带来巨大的环境污染。对于飞行摩托来说，这些问题都可以得到很好的解决，人们将不再受到交通拥堵的困扰，将更多的时间用在工作和陪护家人上，同时还能节省能源，保护环境。

飞行摩托将会在未来带给社会巨大的变革。首先，在交通出行方面，飞行摩托在不久的将来必将会成为主要交通工具之一，因为它可以有效减轻现有的交通压力，为智慧交通和智慧城市的发展贡献价值。在交通状况良好时，它可以在地面上跟摩托一样行驶；在交通拥挤时也可以作为一款飞行器，进行超低空载人飞行，快速通过拥挤路段，节约时间；其次是在灾时救援中，灵活轻便的飞行摩托不仅可以实现对受灾群众的营救，也可以作为运输工具运送人道主义物资，给灾区带去温暖和保障。在警察装备方面，飞行摩托可以为警方在巡逻、抓捕等工作上提供更加快速、便捷的出警方式。在军事上，飞行摩托可用于单兵飞越障碍物、监视、侦察、补给、隐蔽突袭和投送方面的军事需求。对于家有飞行摩托的个人在发生灾难时还可以用于高层逃生。

目前国内外的飞行摩托主要分为两类，一类是以涡轮喷气发动机作为动力源，另一类是以旋翼转动产升的推力作为动力源的飞行器。

1.3 国内外研究现状

飞行摩托概念已经不止一次的出现在科幻影视剧作品中了。飞行摩托在国外的研究较早并已经有相关产品的出现，国内在这一方面起步较晚。

1.3.1 国外研究现状

澳大利亚悉尼发明家克里斯多佛·马洛伊在他的车库里利用一套定制的碳纤维机身和一个宝马发动机制造了世界上第一辆飞行摩托车“Hoverbike”。原型车重二百七十公斤，大约可在三千米的高度飞行，时速将会超过一百六十公里，满燃料状态下可飞行一百多公里，合计约四十五分钟。

美军早在上世纪就开发出了 De Lacker DH-4 飞行摩托，最高时速达到了一百二十千米每小时，采用站姿下置旋翼结构和滑橇式起落架，同时又开发出 Hiller VZ-1 飞行摩托。为了拥有更好的安全性和使用性，它使用了大功率涵道推进器，因此动力性能更加出色，具有更高的飞行速度^[1]。

2014年7月，荷兰正式推出全球史上第一辆飞行摩托车，这款名为“Pal-V One”的飞行摩托车，只需在短短的十分钟内，就可以从摩托车变成旋翼机。Pal-V One 可以在地面或空中的达到每小时一百八十公里的最高速度，并在八秒内加速到七十公里。当处于旋翼机状态时，Pal-V One 可在大约一千多米的高空处巡航，不过它需一个一百多米长的跑道起飞。在着陆时，Pal-V One 最少也需要三十米长的跑道。而在摩托车状态下，Pal-V One 的性能介于摩托车与赛车之间。Pal-V One 有 102 升的油箱储存，满箱状态时的空中飞行约三百多公里、地面行驶距离约一千多公里。但当引擎停止转动时，Pal-V One 的螺旋桨会自动折叠，并变回地面驾驶状态。Pal-V One 全身由碳纤维、钛合金及铝合金制成，总重达六百八十公斤^[2]。

在 2018 年，阿联酋迪拜向俄罗斯 Hoversurf Scorpion 公司采购飞行摩托来装备当地警察，在发生紧急情况或路面拥堵时，警方可以更快速高效的完成执勤任务。该款飞行摩托车最高可离地五米，采用了新型电池和碳纤维框架，最高时速可达九十六公里每小时，续航能力二十五分钟，它还有一种遥控模式，在该模式下飞行时长可长达四十分钟。

1.3.2 国内研究现状

深圳哈威飞行科技有限公司研发了一款陆空两栖的微型个人飞行器，从外观上看像一个加了底盘的摩托车，长有两米，宽有一米八。这款空陆两栖的载人飞行器，可以原地升降，并且低空飞行。它可以自由选择手控或自动飞行模式，最大起飞重量二百六十公斤，有效载重达到七十五公斤。一次完整充电可实现陆地行驶五十公里，并能随时随地垂直起降，低空飞行十分钟。

东莞塘厦赵德力在 2018 年自主打造了一款飞行摩托，这个名为“筋斗云”的飞行摩托主体重达六十公斤，采用四轴八旋翼结构设计，纯电动动力飞行，电机最大输出功率为八十千瓦。根据设计，最大起飞重量达二百多公斤、最高飞行高度为三千米、最快飞行速度每秒二十米，续航里程为三十公里。飞行员可以手

动操控，也可自动驾驶，同时该飞行摩托还能实现自主悬停、自动降落，可通过航点规划实现自主飞行^[3]。

1.4 研究内容

飞行摩托作为一款单人飞行器，结构与原理与无人机相仿，我将参照澳大利亚悉尼的发明家克里斯多佛·马洛伊所设计名为 Hoverbike 的飞行摩托与法国 Ludovic Lazaret 公司设计的 La MotoVolante 两款飞行摩托（如图 1-1），设计一款可以在道路上行驶的采用纯电动旋翼驱动飞行的飞行摩托。本文主要研究设计飞行摩托的整体结构，研究飞行摩托的结构能否实现气动外形飞行条件，使其实现稳定的飞行并做结构设计优化，以保证飞行器的稳定起飞和降落，以保证驾驶人员的安全，使其更好的满足于实际应用。



图 1-1 La MotoVolante

第二章 飞行摩托的总体设计

2.1 总体设计

本章节主要根据一般旋翼式飞行器的经验对旋翼式飞行摩托的总体参数进行初步确定。结合所收集的资料和飞行摩托在空中与地面两个方面的需求分析其车身、旋翼等方面的不同特点，确定最终的布局方案，其总体设计流程图如图 2-1 所示。

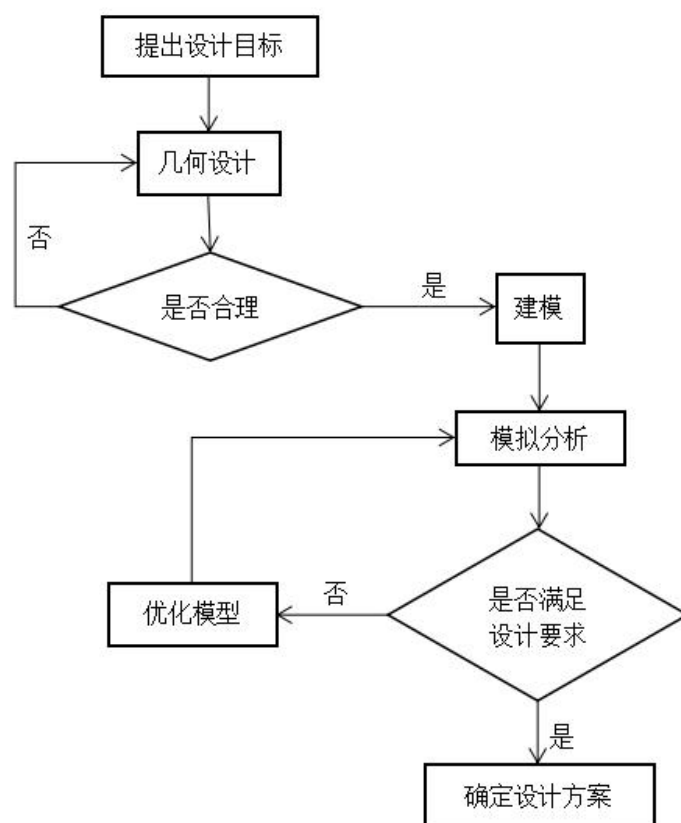


图 2-1 总体设计流程图

飞行摩托总体性能参数如下：飞行摩托总重 280kg，飞行高度约 30-50m，最大飞行速度约 5m/s，续航里程约 30 公里，结构强度安全系数为 2.0，结构稳定性安全系数为 2.0。

2.2 超短距离起飞

本文设计的飞行摩托主要是在正常行驶的道路环境中起飞，而传统的滑跑起飞需要较大的起飞距离，不适合作为飞行摩托主要的起飞方式，故设计相应超短距离起飞能力是非常必要的。

本文飞行摩托可参考自转旋翼机进行超短距离起飞的设计，大多数旋翼机均采用发动机预旋旋翼的方式，将旋翼轴与发动机通过离合器连接在一起，起飞前使旋翼预先旋转，当旋翼达到预定转速时断开离合器并加大螺旋桨推力，旋翼机加速前行过程中，旋翼转速随飞行器加速而加快，达到一定转速时就可离地，这样就可以缩短起飞距离^[4]。同样的原理也可用于本文设计的自转旋翼式飞行摩托中，由于摩托车动力与飞行动力分属于两套不同的系统，所以在旋翼收起状态下（陆地驾驶）紧贴摩托车车轮，因此本文所设计的飞行摩托不需要特定的飞行跑道，可以在行驶过程中进行变形升空，以实现飞行摩托超短距离起飞。

2.3 结构设计

飞行摩托应具备部件主要有：车身、自转旋翼系统、车轮/起落架、电机、电池，以及变形机构。

飞行摩托车车身长为 2.81m、宽为 0.7m、高为 1.44m。为了降低结构重量，车架采用圆柱形空心金属管。同时根据飞行摩托整体形状以及变形需求，飞行布局采取 X 布局，所有旋翼都提供升力，同时又要抵消整体飞行摩托的自转，所以需要正桨和反桨配合，即对角的旋翼旋转方向相同，正反相同。而相邻的旋翼旋转方向相反，正反相反，如下图 2-2 所示。

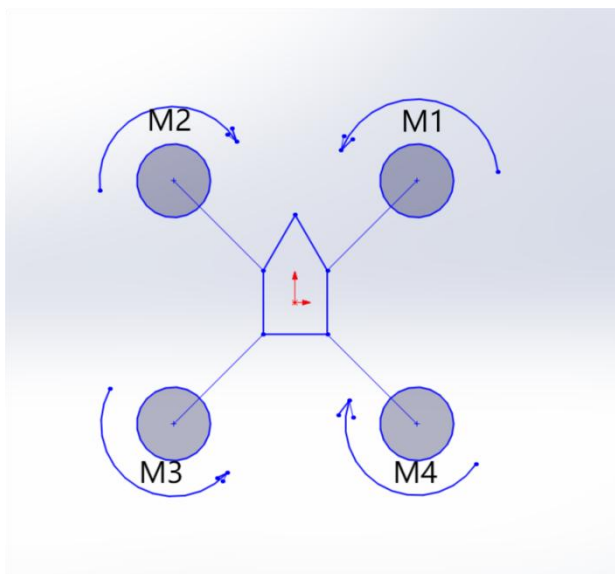


图 2-2 布局

垂直运动:将四个旋翼的转速同时增大或同时减小。

俯仰运动:将前面的两个旋翼的转速减小，或者将后面的两个旋翼的转速增加，飞行摩托就会产生向前上方的力，从而使飞行摩托向前飞行。反之,则将前面的两个旋翼的转速增加，或者将后面的两个旋翼的转速减小时,飞行摩托就会产生向后上方的力，从而使飞行摩托向后飞行。

滚转运动:将左边的两个旋翼的转速增加,或者将右边的两个旋翼的转速减小,飞行摩托就会产生向右上方的合力,从而使飞行摩托向右飞行。反之,减小左边的两个旋翼的转速,或者增加右边两个旋翼的转速,飞行摩托就会产生向左上方的合力,从而使飞行摩托向左飞行。

偏航运动:将斜对角 M1、M3 的旋翼的转速增加,或者将斜对角 M2、M4 的旋翼的转速减小,飞行摩托就会向右旋转,从而实现向右偏航。反之,将斜对角 M1、M3 的旋翼的转速减小,或者将斜对角 M2、M4 的旋翼的转速增加,飞行摩托就会向左旋转,从而实现向左偏航^[5]。

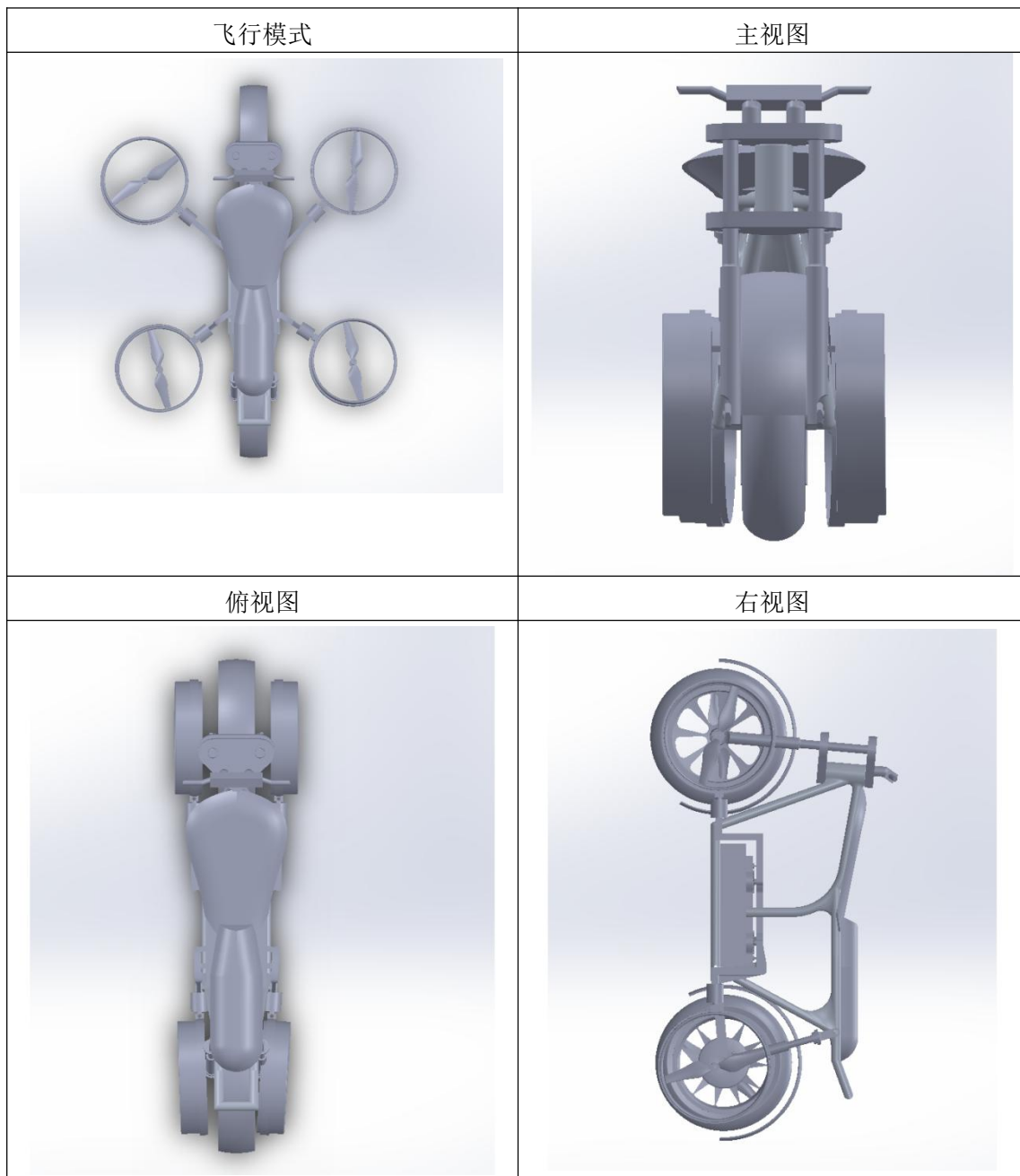


图 2-3 飞行摩托三视图

第三章 摩托车设计理论

3.1 引言

1885 年，德国戈特利伯·戴姆勒在车架机上安装了一个发动机，世界上第一台摩托车诞生了。戴姆勒的第一辆摩托车由四冲程内燃机提供动力，气缸工作室为二百六十四立方厘米，当在每分钟达到七百转时，功率只有零点五马力，时速可达十二千米。该车采用木质结构，后轮为皮带传动，两侧设有辅助支撑轮。

美国是最早生产摩托车的国家之一，包括哈雷—戴维森和印第安等在内的著名公司。1903 年哈利公司生产的摩托车，发动机汽缸工作容积为 409 毫升，功率 2.94kW，采用自行车车架。1907 年，哈雷—戴维森公司制造了第一台 V 型双缸发动机，它所提供给摩托车的动力是传统单缸发动机的两倍。

1923 年，宝马飞机设计者马科斯·弗里兹开始生产摩托车的整车。五百毫升的发动机安装在车架内，气缸延伸到两侧，这是一种简单而高效的设计，该方案被沿用至今。

1951 年 8 月，中国正式开始自行测试和生产摩托车，当时的中国人民解放军北京汽车制配六厂完成了五辆重型军用摩托车的试生产任务，并被中央军委命名为井冈山牌。该车车速最高时速可达一百一十公里每小时。到 1953 年，井冈山牌两轮摩托车的年产量已超过一千辆^[6]。

3.2 车架

车架作为整个摩托车的骨架，就像人的骨架一样，起到支撑和保护作用，不同的是，车架由钢管、钢板焊接组成。它互相连接所有部件，并且具有较高的强度和刚度。通常摩托车采用钢管焊接车架、摇篮式车架或钢板、钢管组合车架，目的是为了减轻整体重量。一些大功率发动机的重型摩托车会采用钢管焊接的双托架摇篮式车架，目的是加强车身强度。

根据现存的两轮摩托车可知，车架型式按装配车辆种类可分为骑式型车架、踏板型车架、弯梁型车架和特殊性型车架共四种车型，如下图 3-1。

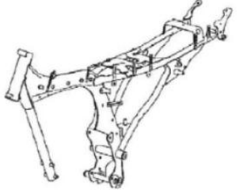
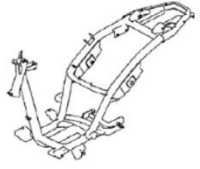
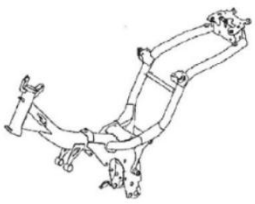
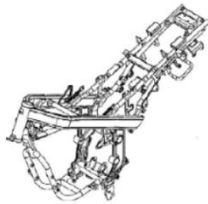
骑式型车架	踏板型车架
	
弯梁型车架	特殊性型车架
	

图 3-1 车型

本次设计的车架结合了骑式型车架和特殊性型车架，如下图 3-2。

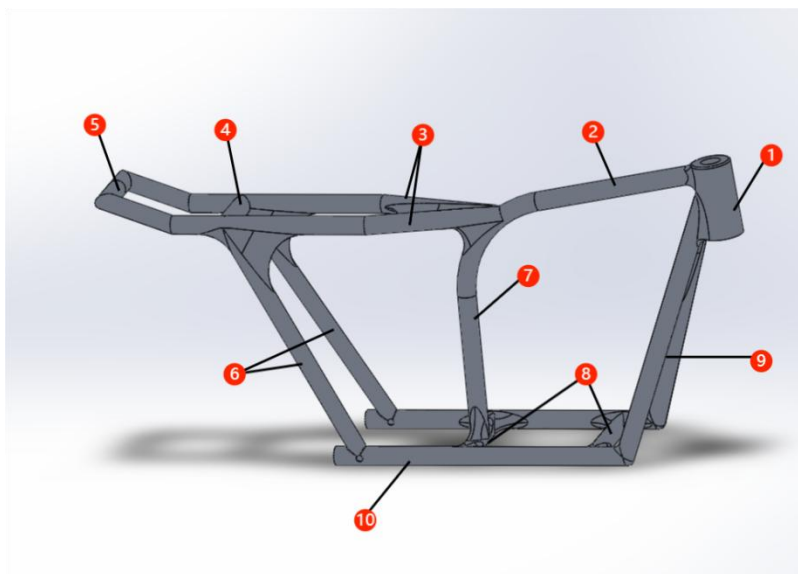


图 3-2 特殊性型车架

1-转向立管 2-主管 3-上管 4-上横管 5-边管 6-后支撑管 7-前管 8-下横管
9-前撑管 10-电池支撑管

3.3 车轮

根据摩托车设计要求，车轮直径为 0.6m。如图 3-3，摩托车的前轮是导向轮，后轮是驱动轮。

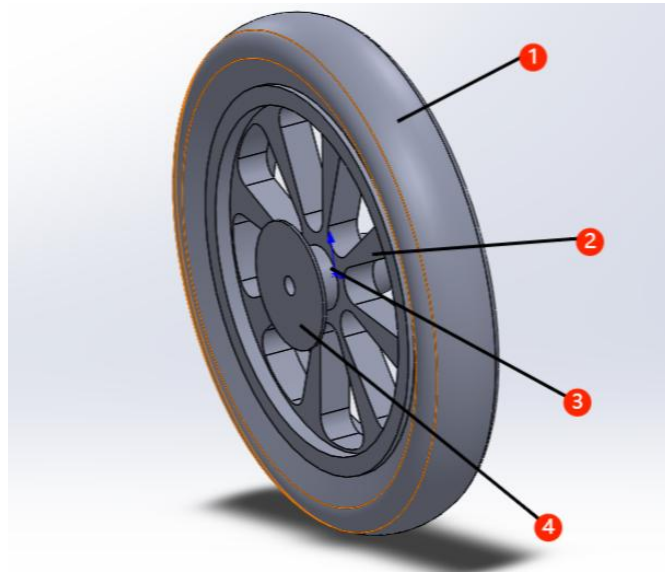


图 3-3 车轮

1-轮胎 2-轮毂 3-轴承 4-刹车制动钢圈

车轮由轮胎、轮辋、轮毂、刹车制动钢圈、轴承和轴组成。前轮的轮毂内装有制动器，还装有速度感应装置，后轮装有电机。在陆地行驶间断，车轮做滚转运动，支撑着飞行摩托在地面的重量。同时前后轮在起飞和降落间断起到充当起落架的功能，在着陆接地瞬间或在不平的道路上行驶时，充气轮胎只能起到小部分缓冲的作用。大部分撞击能量都被减震器所吸收^[7]，如图 3-4。

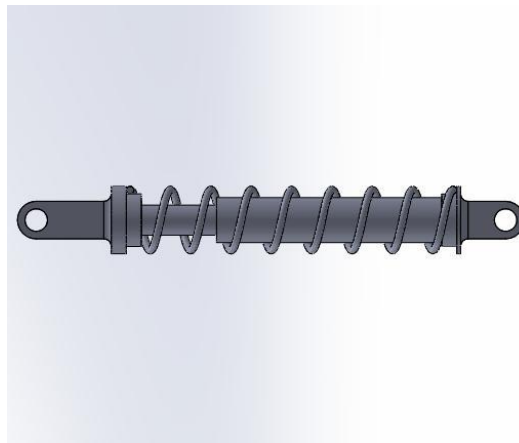


图 3-4 减震支柱

第四章 旋翼设计与分析

4.1 引言

旋翼是飞行器的重要部件。在飞行过程中，旋翼为飞行器提供了各种飞行状态下所需的拉力和操纵力，旋翼性能很大程度上决定了飞行器的性能。

按桨叶与桨毂连接方式的不同，旋翼大体上分为铰接式、无铰式、半铰式和无轴承式 4 种。铰接式旋翼是将桨叶通过水平铰、垂直铰与桨毂相连接。在一般情况下，桨叶除旋转运动外，还有绕水平铰的上下挥舞、绕垂直铰的前后摆动以及通过操纵轴向铰的变距运动。无铰式旋翼是取消水平铰和垂直铰，但仍有轴向铰。桨叶在挥舞方向和摆振方向相对于桨毂是固支的。桨叶的挥舞和摆振表现为桨叶根部的弯曲变形。半铰式旋翼它的特点是只有两片桨叶，彼此连成整体，共用一个中心水平铰，没有垂直铰，但仍有轴向铰。无轴承式旋翼的旋翼不仅没有水平铰和垂直铰，连轴向铰也被取消。桨叶的变距运动靠桨叶根部的扭转变形来实现^[8]。

对旋翼进行设计就是要确定旋翼的几何参数特性，使其在规定的条件下运行时达到预期的设计要求。本章通过对旋翼理论的研究以及一系列计算，要求设计出一款可以提供飞行摩托升空的基本升力的旋翼。

4.2 旋翼设计

旋翼桨叶气动设计采用的基本理论包括动量理论、叶素理论和涡流理论。本文设计的四旋翼飞行器，属于轻小型飞行器，航程与航时要求不高，根据飞行摩托实际设计要求确定设计：

- (1) 根据设计要求来确定旋翼所需升力以及功率；
- (2) 根据上述公式，结合飞行摩托整体结构设计要求，计算出所需的旋翼数、桨叶数目、旋翼直径等；
- (3) 查询旋翼相关设计文献，根据自己设计所需确定旋翼桨叶宽度沿桨叶径向分布；
- (4) 根据旋翼的几何参数，利用 solidworks 三维建模软件，对旋翼进行三维建模。

4.3 旋翼的特性

4.3.1 旋翼的几何特性

旋翼的几何特性是指可以确定旋翼大小与形状的具体参数，一般包括旋翼的直径、旋翼的桨叶数目、旋翼的桨叶宽度、桨叶剖面的安装角分布等。

- (1) 直径 D ——旋翼桨叶叶尖旋转一周形成的圆周直径。

旋翼直径 D 的大小受到许多因素的影响，例如发动机的参数、飞行速度、飞行高度、桨叶数量、和桨叶的安装角等。同时，旋翼直径的大小将会受到实际使用条件的限制即飞行器的本身结构的影响。

(2) 桨叶的数目 N ——桨叶的个数。

在旋翼的几何特征中，旋翼的气动特性和效率会受旋翼桨叶数目的影响。在保持旋翼拉力不变的条件下，增加旋翼桨叶的数目可以减小旋翼的半径和宽度，这样会减小旋翼的迎风面积，从而减小了旋翼整体的迎风阻力；但是，旋翼的桨叶数目越多，所需要发动机的功率也就会越大。

(3) 叶素——旋翼垂直于弦的截面的形状，或称为翼型。

叶素会直接影响整个旋翼的气动特性。不同的翼型具有不同的气动特性，有的翼型比较适合高速飞行、有点翼型比较适合低速飞行、有点翼型噪音较低、有点翼型失速性能更好。针对不同的使用情况，不同的设计要求，应选用不同的翼型。

(4) 桨叶宽度 b ——桨叶截面长度最长的方向即翼型的弦长。

桨叶宽度是逐渐变化的。旋翼桨叶宽度常用最大相对宽度来进行分类，通常旋翼桨叶的最大宽度在 6%-7% 是较窄的，在 8% 左右较为适中，在 9%-10% 之间则是较宽的旋翼桨叶。

(5) 桨叶剖面偏转角 θ ——桨叶剖面的弦与旋翼旋转平面所形成的夹角即偏转角。

为了提供较大的升力以及提高旋翼的效率，同时使所有叶素都能有较好的迎角，所以沿着桨叶径向逐渐扭转，桨叶偏转角也在逐渐变化，习惯上取直径 70% 处的值为该旋翼桨叶角的名称值^[9]。

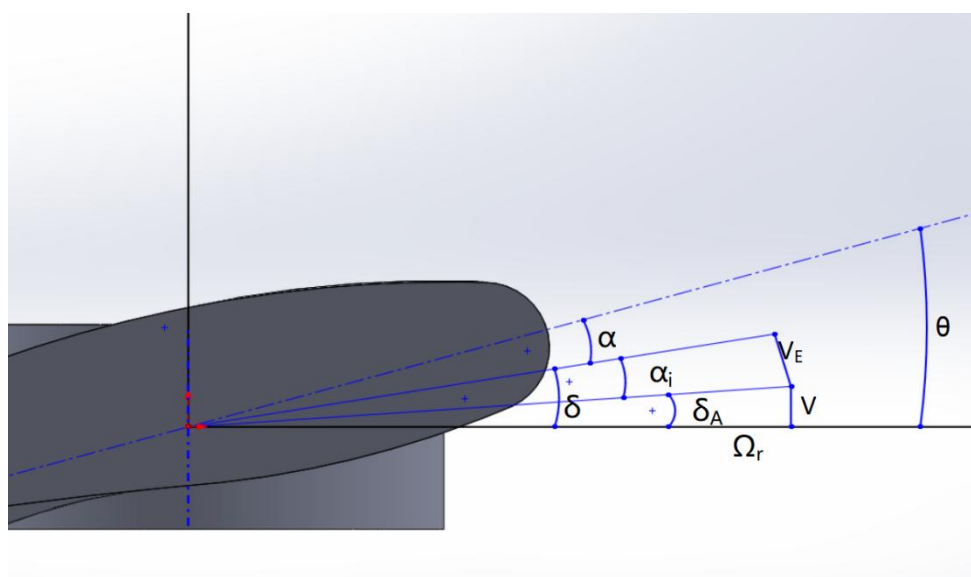


图 4-1 扇叶截面

4.3.2 旋翼的空气动力特性

旋翼的空气动力特性主要是用于确定旋翼的功率、效率以及旋翼的拉力，用来表征旋翼的气动特性参数，而旋翼运动特性主要用于旋翼的前进和旋转的运动参数。

(1) 转速 n ——旋翼一秒钟或一分钟内转动的圈数。

如果旋翼直径一定，随着旋翼转速的增大，线速度也会随之增大，当速度接近音速或者达到音速时会产生激波，使旋翼效率大大降低，所以旋翼的转速和旋翼直径的相互影响。

(2) 前进速度 V ——旋翼运动时来流的速度即进速。

(3) 几何螺距——桨叶剖面迎角为零时，桨叶旋转一周所前进的距离。

几何螺距反映了桨叶角的大小，桨叶各剖面的几何螺距有时候也是不相等的。习惯上取直径 70% 处的几何螺距做名称值。

旋翼效率——旋翼为飞机提供的有效功率与旋翼旋转运动时消耗的发动机功率的比值^[10]。

已知旋翼拉力 T ，根据涡流理论，可以推出桨叶数目 N 。

$$T = \rho 4\pi V^2 \int_{R-R_h}^R (K_1 + K_1^2) K_p r dr \quad (4-1)$$

公式中： ρ 为空气密度； V 为爬升速度； R 为旋翼半径； R_h 为桨毂半径； r 为桨叶某一截面的径向坐标； K_p 为纠正系数； K_1 为过程变量。

$$k_p = \frac{2}{\pi} \arccos \left(e^{-\frac{N}{2} \left(1 - \frac{r}{R}\right) \sqrt{1 + \left(\frac{\Omega R}{V}\right)^2}} \right) \quad (4-2)$$

$$K_1 = \frac{K}{1 + \left(\frac{V}{\Omega r}\right)^2 (1 + K)^2} \quad (4-3)$$

$$\delta = \arctan \left[\frac{\lambda}{\xi_i} (1 + K) \right] \quad (4-4)$$

上述公式中： K 为拉格朗日乘数； $\lambda = \frac{V}{\Omega R}$ 为前进比； $\xi_i = \frac{r_i}{R}$ 为第 i 个截面的无量纲坐标。桨叶尾涡产生的诱导迎角为 α_i ，其计算公式为

$$\alpha_i = \arctan \left(\frac{K \sin \delta \cos \delta}{1 + K \cos^2 \delta} \right) \quad (4-5)$$

实际气流的速度为 V_E ，其无量纲形式为 \hat{V}_E ，其计算公式为

$$\hat{V}_E = \sqrt{1 + \left(\frac{\zeta_i}{\lambda}\right)^2} \cos \alpha_i \quad (4-6)$$

假设无量纲弦长 $c = l/R$ ， l 为实际弦长， $K1$ 为无量纲弦长 c 用弦长分布函数表示为

$$c = c_1 \beta^{-(\xi_i - m)^2} \quad (4-7)$$

公式中： c_1 为最大弦长； m 为最大弦长所在截面的无量纲坐标； β 为弦长分布系数。局部雷诺数和局部马赫数的计算公式为

$$Re_\xi = \hat{V}_E b \cdot Re, \quad Ma_\xi = \hat{V}_E \cdot Ma \quad (4-8)$$

式中： Re 为自由流雷诺数； $Re = \rho V R$ ； $\mu = 1.76 \times 10^{-5}$ ； Ma 为自由流马赫数， $Ma = V/c$ ， c 为声速。计算翼型的升阻比，确定最大升阻比对应的迎角 α_{max} 。某一截面的桨叶角 θ 为

$$\theta = \delta + \alpha_{max} \quad (4-9)$$

重复上述公式，计算出所有截面的弦长 l ，桨叶角 θ [11]。

4.3.3 旋翼参数

在旋翼拉力、爬升速度和旋翼转速给定的情况下，旋翼最高升力的效率的能量损失是最小的。而当桨叶所有截面都处于最大升阻比迎角时，旋翼的升力效率是最高的。

为了给飞行摩托提供足够的升力，旋翼提供的升力大小需参考飞行摩托的实际状态。因此，旋翼设计还需要考虑飞行摩托的整体设计参数：飞行摩托设计巡航高度为 20m，最大巡航速度 5m/s，飞行摩托设计总重为 300kg。

因此飞行摩托起飞旋翼所需要产生的升力为：

$$F = mg = 3000N \quad (4-10)$$

由此得出一个旋翼需提供 750N 的升力。

飞行摩托采用四旋翼结构，在忽略大气压强与地面压强的差异，巡航高度 20m 处可以采用地面大气压强。故每个旋翼应最少产生 75kg 的升力才可使飞行摩托完成飞行任务。由于飞行摩托还需要一个向前的运动，故旋翼产生的升力应大于 75kg，为便于计算将旋翼设计升力取为 800N。

此时旋翼需要吸收的功率为：

$$W = FV/\eta = 5.36kW \quad (4-11)$$

其中， η 表示旋翼效率，根据经验取的旋翼的效率为 70%； F 表示旋翼在额定转速下所产生的升力 [10]。所以飞行摩托电动机的功率预计为 8kW。

旋翼拉力不变的情况下在还需要考虑翼尖处马赫数对旋翼的影响。根据以往试验数据表明，当翼尖处马赫数达到 0.85 时，翼尖处将会出现激波，会大大的降低旋翼的效率，所以旋翼的桨尖处马赫数不应大于 0.85^[12]。因此在这里最大转速取为 250rad/s。

根据飞行摩托车轮结构设计，由于车轮直径为 0.6m，而旋翼与车轮的轴线共线且直径相等，所以确定旋翼直径为 0.6m，桨毂直径为 0.05m。由上述公式 (4-1)(4-2)经计算得出旋翼为 4 桨叶旋翼。

综上所述，最后确定旋翼直径为 0.6m，桨毂直径为 0.05m，桨叶数为 4，最大弦长为 0.08m，最大桨叶角为 20°，最大转速为 250rad/s。

4.4Flow Simulation 模拟分析

根据以上旋翼特性和旋翼设计理论，利用 Flow Simulation 插件进行叶片设计并对旋翼的四桨叶进行分析。

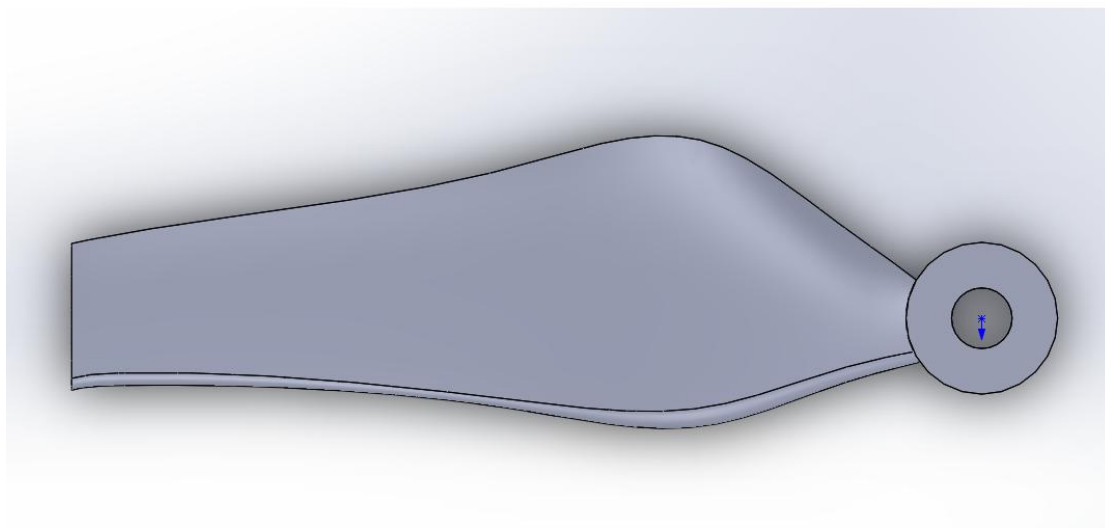


图 4-2 扇叶模型

如图 4-2 为本次翼型宽度和安装角分布设计。

4.4.1Solidworks Flow Simulation 简介

SolidWorks Flow Simulation 是 SolidWorks 软件中的插件，用于液流仿真和热分析，Flow Simulation 程序可以在设计分析过程中节省大量的时间和成本。它被广泛应用于航空航天及机械制造等领域。Flow Simulation 可以分析仿真真实条件下的液体和气体的流动、传热和相关作用力的效果。分析的流体有：气体、液体、非牛顿流体、可压缩气体、真实气体、蒸汽等。

Flow Simulation 模拟分析的主要步骤有：

①创建 EFD.Lab 项目。使用向导创建一个新的例子，并将计算数据存储在一个新建的文件夹中；选择系统的单位(SI)；选择分析类型(Internal 分析和 External 分析)；选择需要分析的流体类型(Fluids)；定义壁面条件；仿真结果精度的设定(Result Resolution)，它不仅控制需要求解的网格，而且还设定了许多求解参数（越高的结果精度，就会产生越精细的网格，同时收敛标准也会越严格）。这一步骤完成，相当于完成了整个工作的 80%。

②定义边界条件。在系统的流体入口或者出口处，按需求设置压力，质量流，体积流，速度或力的边界条件。

③定义工程目标。选择所需的目标参数。

④求解。

⑤检测求解过程。此功能可以在计算机分析运行的时候观察结果，它有助于设计者确定是否正确的定义了所有的边界条件，并且允许设计者能直观的看到求解初期的仿真结果。在仿真运行开始时，数据结果通常会发生剧烈变化。但随着迭代次数的增加，数据变化将会趋于一个稳定的结果并将达到一个收敛值。

⑥载入和导出结果^[13]。

4.4.2 旋翼模拟分析

①创建 EFD.Lab 项目，按下表 4-1 按下表创建一个新的项目：

表 4-1 EFD.Lab

项目名称	旋翼分析
单位系统	国际单位制 SI
分析类型	外部，排除内部空间
物理特征	旋转，局部区域（平均）
默认流体	空气
壁面条件	绝热壁面
初始条件	压力 101325Pa，温度 293.2K

②定义计算域，按下表 4-2 定义计算域的大小：

表 4-2 计算域值

$X_{\max}=1$	$Y_{\max}=0.35$	$Z_{\max}=0.35$
$X_{\min}=-2$	$Y_{\min}=-0.35$	$Z_{\min}=-0.35$

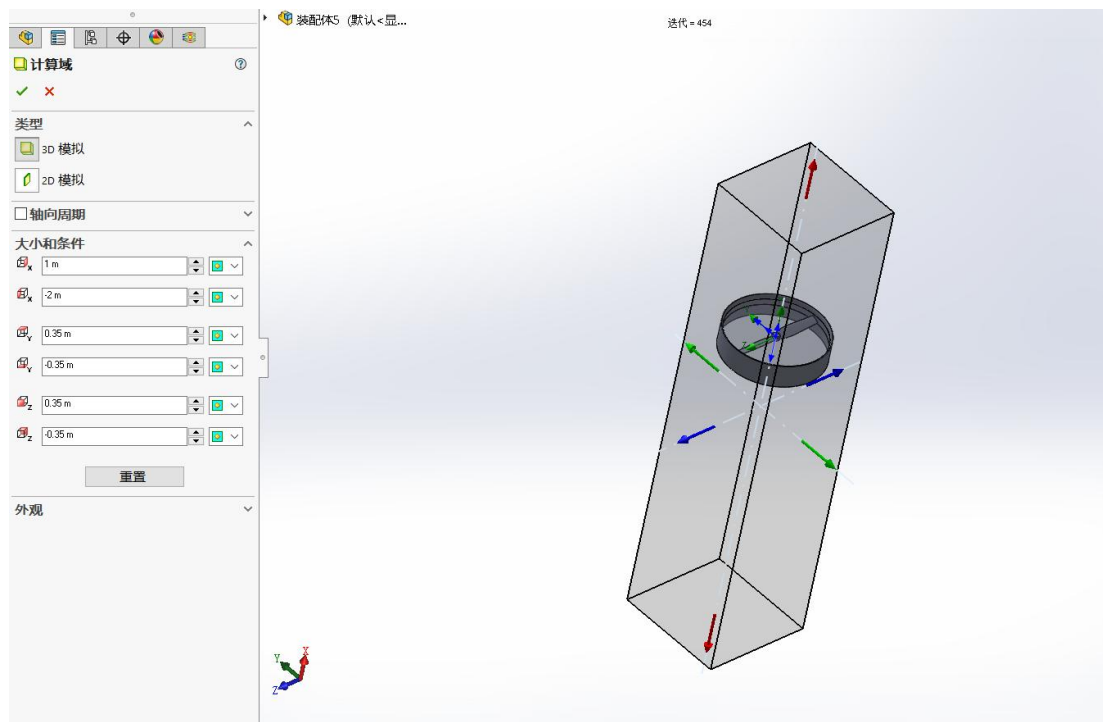


图 4-3 计算域

③定义目标，定义如下表 4-3 的目标：

表 4-3 定义目标

目标	目标名称
表面目标	桨叶平均静压
表面目标	桨叶平均速度
表面目标	桨叶沿 X 轴方向的力
表面目标	桨叶沿 X 轴方向的扭矩
表面目标	涵道沿 X 轴方向的力
全局目标	沿 X 轴方向的平均速度
方程目标	桨叶沿 X 轴方向的力+涵道沿 X 轴方向的力

④求解过程

Flow Simulation 程序能够根据结果精度设计能够自行的划分网格。

由图 4-4 可知，我们可以观测求解过程，在计算机运行求解的时候我们就能直观的看到在求解初期的仿真结果，这有助于确定是否正确并全面的定义所有边界条件。在仿真运行开始阶段，结果是剧烈变化的。但随着迭代计算的进行，变化将趋于平稳，而且结果将达到一个收敛值。

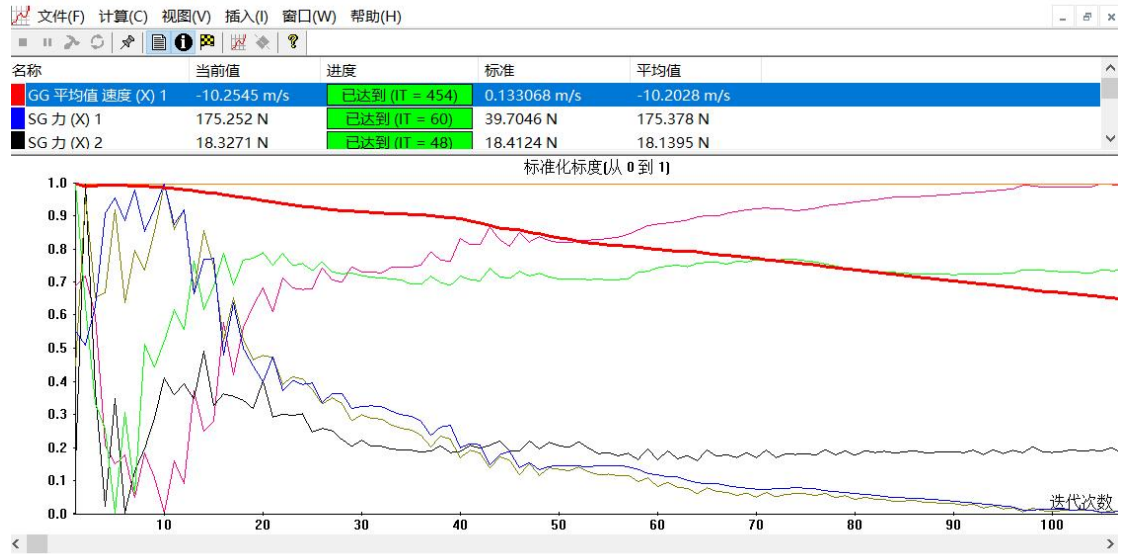


图 4-4 折线图

⑤结果

为了提供足够的升力，旋翼采用四桨叶结构，通过模拟分析得出如下表 4-4 数据。

表 4-4 升力

转速 (rad/s)	100	150	200	250	300	350	400
升力 (N)	175.378	303.418	651.973	877.086	950.158	977.598	991.547

如上表为在不同转速下旋翼所产生的升力。由表中数据可知，当旋翼转速为 250rad/s 时旋翼所产生的升力约为 877N，因此当旋翼为四旋翼结构时，旋翼所产生的升力满足设计要求。

当旋翼转速为 250rad/s 时得到桨叶的速度分布图，如下图 4-5。

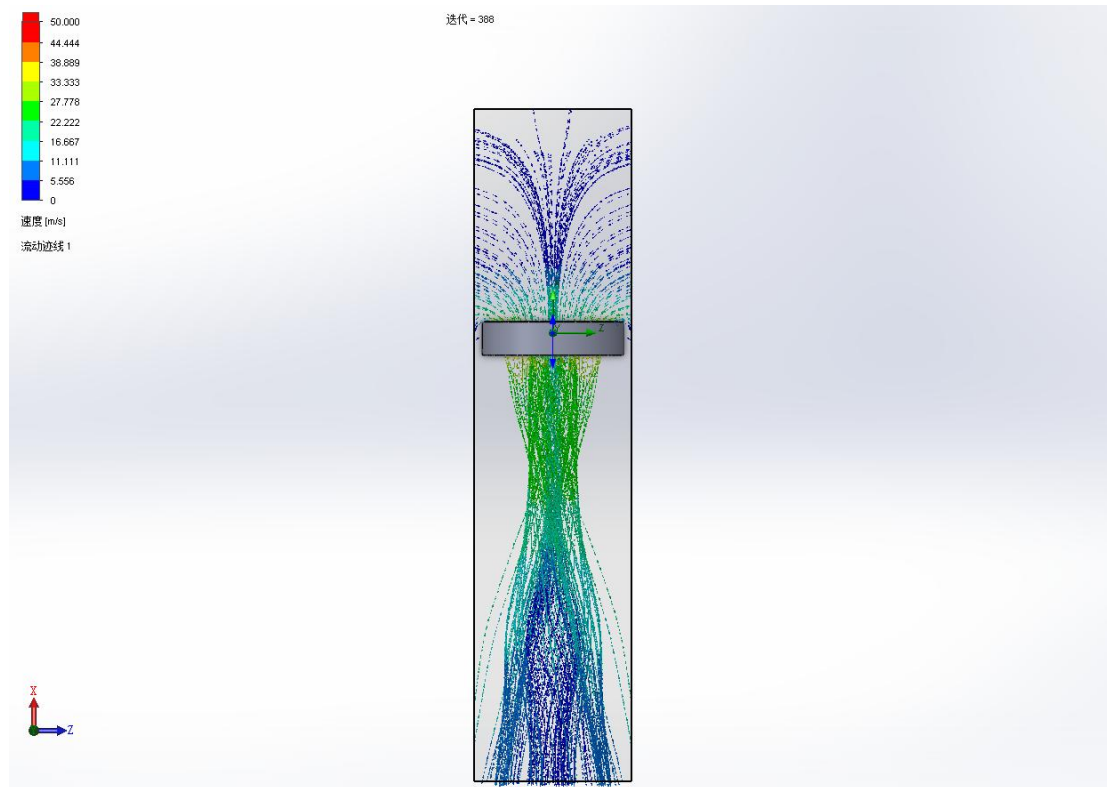


图 4-5 速度流迹图

第五章 总结与展望

5.1 工作总结

本文研究飞行摩托结构设计与分析，已完成研究的主要工作包括：

- (1) 根据所收集的摩托车构架，结合自身数据，自行设计了一款电动摩托。
- (2) 完成了旋翼构型的气动模型的理论分析和研究。基于叶素理论，文中建立旋翼模型。结合各构型的结构特点以及飞行摩托的设计需求，合理选择飞行摩托的旋翼构型并确定旋翼参数，从而形成了合理有效的旋翼式飞行摩托旋翼构型的选择和设计方法。
- (3) 完成了飞行摩托的总体设计和尺寸参数。

飞行摩托应具备部件主要有：车身、旋翼、车轮、连接件，电池和冗余。部分尺寸参数：

旋翼离地高度：	0.3m
旋翼直径：	0.6m
桨毂直径：	0.08m
车身长宽高：	2.81m*0.7m*1.44m
车身最低点离地高度：	0.39m
车体总重：	220kg
载人 1 人：	80kg

5.2 不足与展望

本文主要通过理论研究的方式，逐渐形成飞行摩托的车身设计以及旋翼和连接件分析并包含了总体方案设计的方法，并对旋翼与连接件特性进行了重点研究，分析了这些构型运用于飞行摩托的结构等方面的特点。但在设计工作进行的过程中也暴露了一些问题未能进行相关方面的研究或补充，例如车身气动外形设计等。由于受到时间和条件的限制，很多方面还需要进行进一步的研究和试验。例如文中对旋翼的研究结果还需要进行相关的风洞试验，对计算结果进行进一步的试验验证。

文中设计的飞行摩托同样也需要进一步优化，以获得更完善的成品，进而可以依据数据设计出飞行摩托产品。同时在总体方案的设计过程中，本文更多是对飞行摩托能否达到所需升力进行分析计算，没有对其在运动模式下的性能计算，需要进一步的试验和计算。并且在进行总体方案的设计中，由于各部件的具体尺寸未能确定，故其部分部件的外形及布局等工作仍需要进行更详细的开展。由于飞行摩托在正常工作下需要进行空中与地面模式切换，其转换系统的设计也是飞行摩托需要进行进一步优化的方向。

参考文献

- [1] 张胜利, 席德科. 飞艇螺旋桨气动优化设计[J]. 机电一体化, 2009,15(11):78-81.
- [2] 毛玥. 飞机螺旋桨设计与气动特性及滑流影响研究[D]. 南京航空航天大学,2016.
- [3] 飞行摩托车开售[J]. 世界知识, 2014(15):77.
- [4] 裴思宇. 多旋翼电动无人机动力系统建模与旋翼失效性能评估研究[D]. 吉林大学,2021.DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2021.002498.
- [5] 杨桐. Quad-rotor 飞行器控制问题研究[D]. 哈尔滨工业大学,2009.
- [6] 胡长见, 丁钰彭. 民航飞机系统设计与分析 [J]. 电脑知识与技术, 2018,14(07):203-205.DOI:10.14004/j.cnki.ckt.2018.0794.
- [7] 邓喜全. 草地蝗虫吸捕机的改进设计与试验[D]. 内蒙古农业大学,2015.
- [8] M. HASSANALIAN,R. SALAZAR,A. ABDELKEFI.Conceptual design and optimization of a tilt-rotor micro air vehicle[D].New Mexico:New Mexico State University,2019.
- [9] 王豪杰, 李杰, 付炜嘉, 等. 无人机螺旋桨气动设计[J].应用力学学报, 2012, 29 (4) : 380-385.
- [10] 冯旭碧. 某旋翼飞行器涵道桨叶设计研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2019.
- [11] 罗健. 新型高性能螺旋桨设计及悬停气动特性分析[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
- [12] Lelkov K S,Ulyanov D V,Surkov D A,Ushakov A N. Development of the mathematical model for the tilt-rotor aircraft[J]. Journal of Physics: Conference Series,2021,1925(1).
- [13] 张仁亮. 基于 SolidWorks 的风力机叶片三维建模及模拟分析[D]. 湘潭大学, 2012.

致谢

在修修改改中，不知不觉这篇论文已经到了结尾，但总觉得有很多不如意的地方，大概是能力有限吧。我的大学生活即将画上一个圆满的句号，所以毕业设计是我最后一份大学作业，我努力使它尽善尽美。这专升本的两年，我过的无比充实，从刚进入一个新环境的无比憧憬，到五彩斑斓的大学生活。课堂上老师们那渊博的学识彻底征服了我，身边同学们学习时的认真热情和生活上的热心主动，者所有的一切都历历在目，让人无比怀念。

天津中德应用技术大学的生活是我人生道路上难以磨灭的一部分，在我心中占据了重要位置。在大学中认识了许多新的同学和老师，我非常感谢每一位对我无私的帮助，尤其是感谢我的导师。从题目的选定，到论文的最后完成，在姚老师的谆谆教诲下，使我克服一个又一个难题，他态度严谨，非常有耐心，说话幽默风趣又激情洋溢，在老师的指导下，我最终从容不迫的完成了毕业设计。

最后再一次感谢天津中德应用技术大学，是你给我再一次的深造，感谢一直陪伴我的老师们、同学们还有那辛苦养育我的家人们。