

SUSTech

无人机抓捕机构的设计

王文晖，谢济宇，黄骁，张晓宇

指导老师：陈昀昊，邓辉

2018-1-14

目录

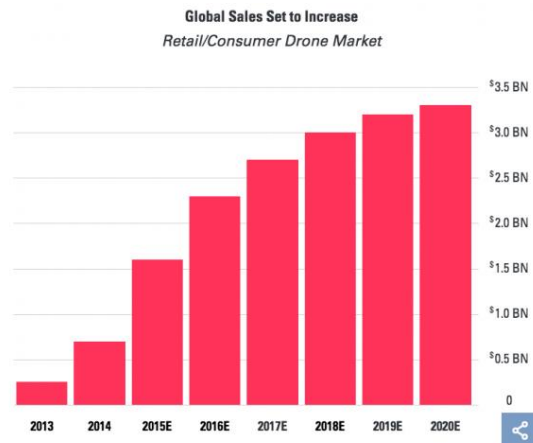
1. 背景	3
1.1 无人机与公共安全	3
1.2 现有无人机捕捉方式及分析	4
2. 项目目标	5
3. 项目方案	5
3.1 方案选取	5
3.2 方案介绍及捕捉模式	6
4. 结构	9
4.1 网	9
4.2 拉升动力	9
4.3 剪叉机构	12
4.4 底部框架机构	13
4.5 安装机构	15
4.6 整体结构	16
5. 选型、设计与校核	17
网	17
5.1 网受力	17
5.11 运载无人机的拉力	17
5.12 无人机之间的短时相对运动冲力	18
5.13 螺旋桨与网的剪切与挤压	19
5.2 网选型	20
底部机构	20
5.3 底部框架	20
5.31 框架受力	21

5.32 框架材料选取与尺寸设计	21
5.4 卷网机构	22
5.41 弹簧选型	23
5.42 电机选型与卷网时间	24
5.43 轴承选型	24
剪叉机构	25
5.5 材料选取	25
5.6 仿真校核	25
拉升动力系统	25
5.7 电机与齿轮组	26
5.71 动力需求	26
5.72 电机选型	26
5.73 齿轮组传动比	26
5.74 齿轮设计与材料选取	27
5.8 其他部分	28
5.81 连接盘设计	28
5.82 电磁铁与弹簧选型	29
5.83 拉绳选型	29
6. 总结	30
7. 参考文献	31

1. 背景

1.1 无人机与公共安全

随着时代的发展，各种科技领域的成果逐渐渗透入人们的日常生活之中。作为其中的一个代表，无人机产业已经成为除了手机、电脑、穿戴设备以外的发展最为迅速的消费类电子产业。越来越多的普通消费人群也有更多的机会通过无人机触及到以往正常渠道无法触及的区域。



技术飞速发展的现在，目前民用的无人机性能已经非常高了，然而目前在对无人机的管理还急需完善，其中存在很大的隐患。近几年全球各地都出现了多起民用无人机的案件，由于缺乏相应的管理，这些案件很多都存在无法及时阻止乃至肇事机，令肇事无人机完成违法行为乃至完成后逃脱的问题。小到民用的无人机因缺乏管理飞到机场附近无意影响拖延了航班，大到某些不法份子有意地利用无人机的管理漏洞进行不法活动，这些行为无疑都是对公共安全的重大威胁。比如：

2013 年 12 月，北京一家航空科技公司员工操纵无人机在首都机场附近违规测绘，造成多架次民航飞机紧急避让延误。

2014 年，美国航管局 FAA 调查，大型户外体育赛事中，无人机擅自闯入和坠毁事件时常发生，多达近千起。

摩苏尔的 ISIS 把消费级的大疆无人机应用于军事行动中，ISIS 将商用无人机改装成了“无人轰炸机”，把一枚 40mm 的手榴弹装在塑料桶内，从而疯狂轰炸伊拉克联军等等。



这些案件同时也引起了我国相关部门的注意，我国近几年陆续出台了《民用无人

驾驶航空器系统驾驶员管理暂行规定》，《轻小无人机运行规定（试行）》等等法律法规以规范这个新的领域内的方方面面。

而法律法规的实行离不开监督管理和抓捕处罚。如果没有实际的监督管理，只靠法律的文字是并不能解决问题的。而如何高效地抓捕违法的无人机，以阻止和减少违法无人机造成的公共安全影响，就成为了一个重要的课题，我们需要一套有效的系统和相应的捕捉设备来达成这个目标。

1.2 现有无人机捕捉方式及分析

世界各国在解决如何有效地抓捕无人机这个领域上，已有不少的成果，已经有了一些捕捉无人机的方案。大致分为地对空捕捉和空对空捕捉。地对空捕捉局限性太大，且成功率极低。空对空捕捉又分为用无人机捕捉和训练动物来捕捉无人机。用动物捕捉无人机以荷兰最先，随后法国也效法了他们，均采用训练老鹰的方法来进行违法无人机捕捉，但是这种方法成本极高，且很难得到广泛的应用（法国的计划实施总共只训练了四只老鹰），不能满足无人机日益泛滥和需要广泛管理的现况。

用无人机来捕捉无人机，从控制系统的方式分，可分为地面处理信号再控制空中的无人机进行抓捕和空中无人机自主处理目标信号并实施抓捕。鉴于作业环境（空中）的特殊性和与之对应的各方面的技术难度，以地-空系统为主流模式。

从抓捕方式来分，又有以无人机挂网使目标机种挂于其上和弹射出网包裹住对象目标的模式。因为是高空作业，而无人机掉落到地面可能会造成危险，所以抓捕模式都是这种尽量困住目标而不使其坠落的形式。挂网的方法不能保证对象机体不掉落，而弹射一个用绳子连接住的网包裹对象的方案存在的问题是如果没有捕捉住对象，弹射出去的网难以回收以进行二次捕捉。



已有的方案都或多或少存在不少问题，而我们需要采用和改进其中的某种方案或者另想一种新的方案。

2. 项目目标

设计一套用于抓捕无人机的装置, 其具有以下特点:

1. 设计基础: 母体(抓捕设备)的飞行性能和强度高于目标机体
2. 假想抓捕目标: 市场上最常见的民用无人机
3. 性能要求: 较高的成功率; 较好的捕捉范围; 能二次捕捉; 保证目标对象不掉落; 结构强度足够高而不会被目标物造成损毁
4. 其它要求: 成本尽可能低; 操控难度尽可能低

3. 项目方案

3.1 方案选取

为了实现项目的目标, 即设计一种捕捉成功率较高、可重复使用、成本较低的无人机抓捕机构, 在查阅了相关的资料之后, 我们初步得出了三种比较可行的抓捕模式: 无人机母舰抓捕、气动弹射抓捕以及全机械抓捕。

无人机母舰抓捕, 该抓捕模式的运行方式是: 工作时, 小型无人机不运行并悬挂在大型无人机下, 通过大型无人机携带多个小型无人机升高, 当大型无人机靠近目标时, 小型无人机带网高速接近目标并缠绕, 对目标无人机进行抓捕。

气动弹射抓捕, 该抓捕模式的运行方式是: 设计一种抓捕装置悬挂在无人机下方, 在抓捕装置中加入传感器等电子设备对目标进行锁定并逐渐靠近, 运行至被抓捕无人机上方时, 以气动将抓捕装置弹出, 对目标迅速进行抓捕。

全机械抓捕, 该抓捕模式的运行方式与气动弹射抓捕相似, 不同的是气动抓捕是以气动将抓捕装置弹出, 对目标进行抓捕, 全机械抓捕是使用剪叉式机构将抓捕装置弹出, 对目标进行抓捕。

在对三种抓捕方案进行了解之后, 我们对三种方案从成本、结构复杂程度、抓捕成功率、使用难度、捕捉范围、设计难度六个方面进行对比, 结果如下表所示, 其中“-”表示不可行, “●”表示基本可行, “✓”表示可行

	成本	结构	成功率	使用难度	捕捉范围	设计难度
无人机母舰	-	-	✓	-	✓	-
气动弹射抓捕	●	●	●	✓	-	●
全机械抓捕	✓	✓	●	✓	-	✓

表 1. 三种方案设计因素对比

无人机母舰抓捕方案由于具有大型无人机续航能力强, 小型无人机飞行速度快等特点, 所以该方案的抓捕成功率较高, 且抓捕范围很广, 但同时由于需要一个大型母舰无人机以及多个小型执行无人机, 导致该方案成本很高, 且操纵多台无人机的技术要求很高, 如何让捕捉网不影响小型无人机飞行, 无人机回收、投放机构设计难度较高等问题, 使得我们首先放弃了该方案。

气动弹射抓捕方案在结构上只需一台大型无人机及一个气动抓捕装置, 在成本上要优于无人机母舰抓捕方案, 在结构设计上, 气动弹射抓捕比无人机母舰要

容易实现，但由于在实际中要考虑气密性，弹射减速等实际因素，增加了其结构的复杂程度和设计难度，在抓捕范围上，由于抓捕装置在无人机正下方，也就是说该方案只能在目标无人机正上方进行抓捕，抓捕范围相对于无人机母舰方案十分局限，成功率也有所下降，但由于是其依靠传感器等技术实施目标锁定、巡航等操作，使得该方案的使用难度大幅下降。

全机械抓捕方案与气动弹射方案相似，但由于使用剪叉装置代替了气动弹射装置，使得全机械抓捕方案在成本、结构以及设计难度上又进行大大的优化。

综上所述，我们最终选取了全机械抓捕方案作为本项目的最终实施方案。

3.2 方案介绍及捕捉模式

在确定了方案之后，我们对全机械抓捕方案的具体内容进行了讨论，最终确定了全机械抓捕方案的系统运行方法以及其具体机构的结构内容。

其系统基本工作原理如下：

（1）雷达等探测跟踪预警设备对目标进行探测，在发现抓捕目标后对其进行跟踪，与此同时向地面控制工作站发出警告。

（2）地面控制工作站通常是地面或机载、舰载，是飞行操控中心，实现人机交互，通常也是任务规划中心。通过上行通信链路发送指令，控制飞行，操控所携带的各种任务载荷；通过下行通信链路，飞机回传信息和图像。包括载荷数据、机上各分系统的状态信息、位置信息等。同时控制发射与回收。控制站与外界通讯完成获得天气信息、个系统间的网络信息传输，接收任务，汇报信息等。

（3）上行通信链路：发送飞行路径数据并储存，当人在回路时，实时发送飞行控制指令、发送控制命令至机载任务载荷和附属设备、发送相关位置更新信息到惯导/自动飞行控制系统。下行通信链路：发送有关飞机的位置信息到控制站、发送任务载荷图像和数据到控制站、发送飞机状态信息。

（4）当无人飞行器接受到来自地面控制工作站的通信链路时，完成起飞、飞行、巡航、靠近目标、悬停、返航、降落及待命等任务。当抓捕失败时，无人飞行器能够再次接受指令重新进行任务。

（5）当得到抓捕命令时，挂载在无人飞行器上的无人机抓捕机构完成一系列动作，实现对目标的抓捕。抓捕动作结束后，该无人机抓捕机构处于待命状态。

详细的无人机抓捕系统组成框架（图 A）、无人机抓捕系统实施步骤（图 B）以及无人机抓捕系统工作流程图（图 C）如下所示：

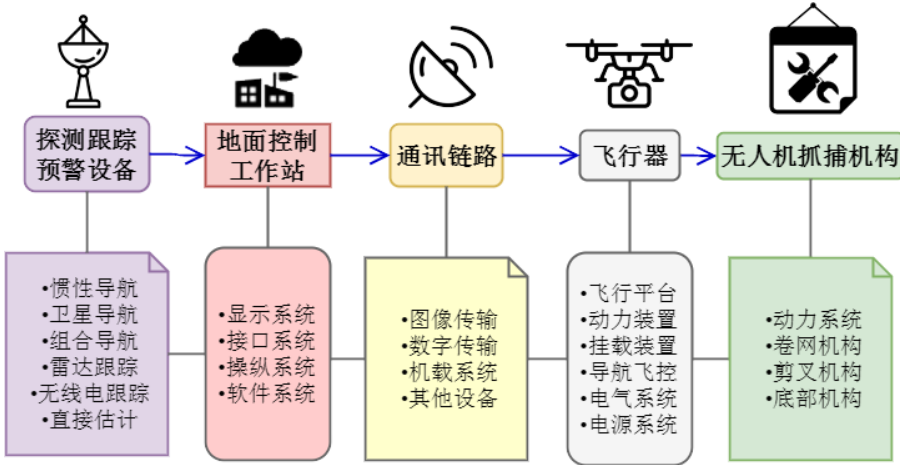


图 A：无人机抓捕系统组成框

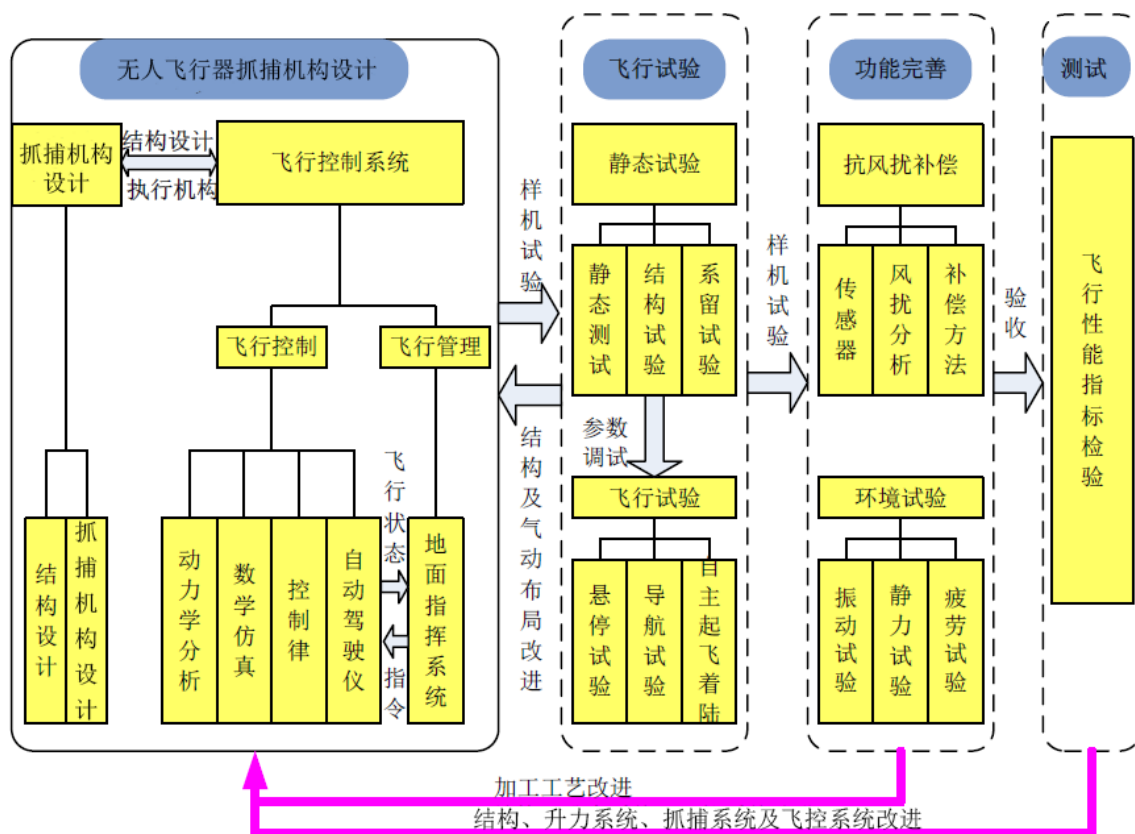


图 B: 无人机抓捕系统实施步骤

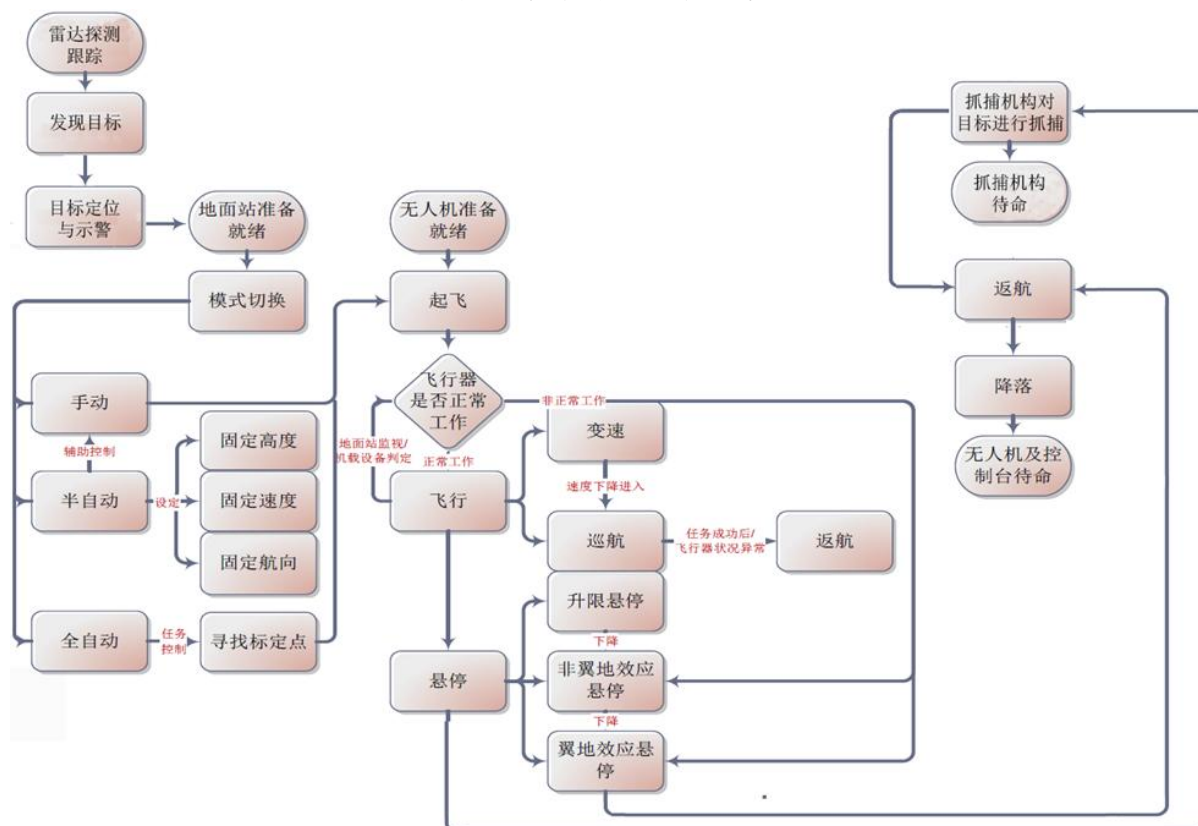


图 C: 无人机抓捕系统工作流程图

全机械抓捕方案的机构在整体上是使用网绳为基本的牢笼式结构，分为网、底部框架机构、剪叉机构以及拉升动力机构四个部分，将结构示意图如下所示。

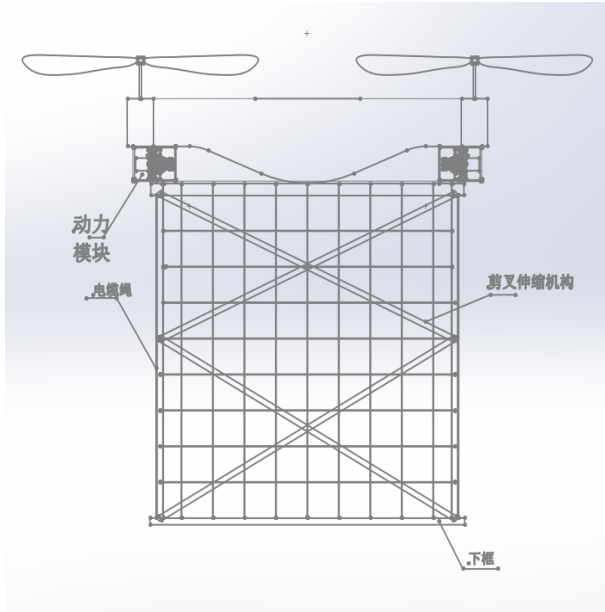
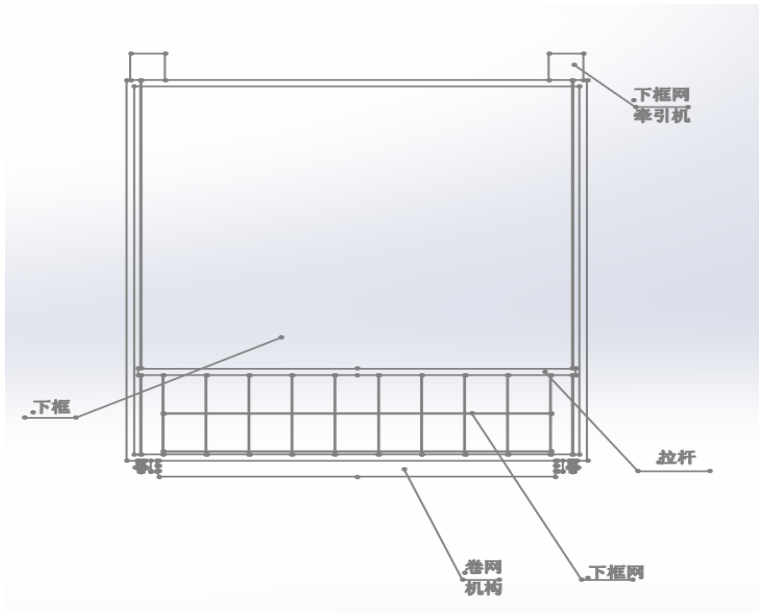


图 3.1 抓捕机构结构示意图



3.2 底部框架机构示意图

该机构的抓捕方式是通过剪叉机构将四周围网和底部框架机构放下，在围网将目标无人机笼罩之后，底部框架中的卷网在牵引电机的牵动下迅速收拢，形成一个封闭的牢笼空间，将目标无人机困在其中，实现对目标无人机的抓捕，同时底部的网可以有效防止被抓捕无人机的掉落，提高了安全性，若第一次抓捕失败，拉升动力机构会把底框收回，同时底框中的卷网机构也会把底框的卷网收回，使得整个抓捕机构回到抓捕前的状态以便实施第二次抓捕。参考市面上常见无人机的体积，考虑到抓捕设备自身设备的安装空间以及抓捕空间余量等因素，我们将抓捕设备的尺寸定为 800mm*800mm*800mm。抓捕机构四个部分的具体内容将在下一节进行论述。

4. 结构

在本项目中，我们运用 CAD 设计软件-SolidWorks 来进行设计表达。

4.1 网

抓捕机构中的网分为四周的围网和底部的卷网，对于网，只要满足机构的需求即为合适的网，我们将在第 5 节对网的选择进行讨论，由于 SolidWorks 软件本身的局限，无法实现柔性网的表达，所以本项目所有 CAD 设计模型中都没有网，而是用网的安装位来代替网。

4.2 拉升动力机构

拉升动力机构示意图如图 4.1 所示

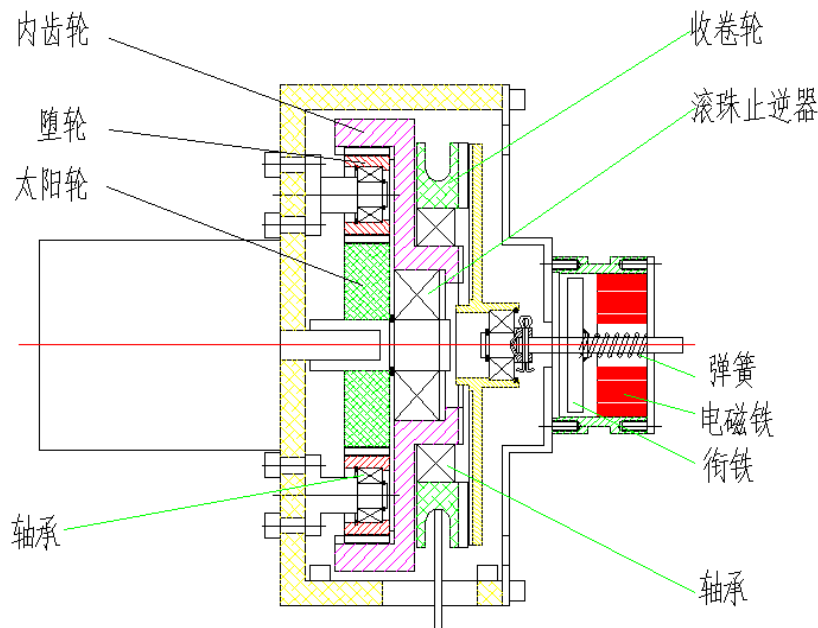


图 4.2.1 拉升动力机构结构示意图

设计拉升动力机构的设计的目的是为了将放下的抓捕机构重新拉回以便实施二次抓捕，同时又不能影响抓捕机构的放下，为了实现这两个目标，则需要一个电机进行动力输出和一个收卷轮配合来实现拉升放下的动作，由于电机输出转速很高，扭矩有限，需要一套减速装置来提速升力，为了节省空间以及好与收卷轮配合，设计了一套类行星齿轮减速器，将电机的高速输出通过太阳轮、惰轮以及内齿轮转化为内齿轮的低速转动，由于收卷轮需要在放下时可以自由转动，在拉升时与动力输出配合为一体，则需要设计一套可以控制的锁紧装置来使收卷轮与内齿轮配合，于是设计了一套由电磁铁驱动的锁紧配合机构，在收卷轮讲底框成功拉回后，为了防止底框再次下落，则需要一个锁死装置，为了简化结构、节省空间，我们使用滚珠止逆器来实现这一功能，滚珠止逆器为标准零部件，外观与轴承相似且带有卡槽位。其内圈与外圈只能产生一个方向的相对转动，而当其具有另一个方向转动趋势时，内圈与外圈锁死，阻碍这一方向的相对运动，运用这一原理，我们可以实现收卷轮的自锁死。

其锁死原理是：在牵引收卷和锁紧状态下，收卷轮与内齿轮始终保持相对位置不变。故将其作为一个整体考虑。在牵引收卷状态时假定滚珠止逆器内圈不动时，外圈相对于内圈逆时针运转无阻碍。则内圈固定时，外圈具有顺时针转动趋

势时，内外圈锁死形成一个整体保持相对位置不变。

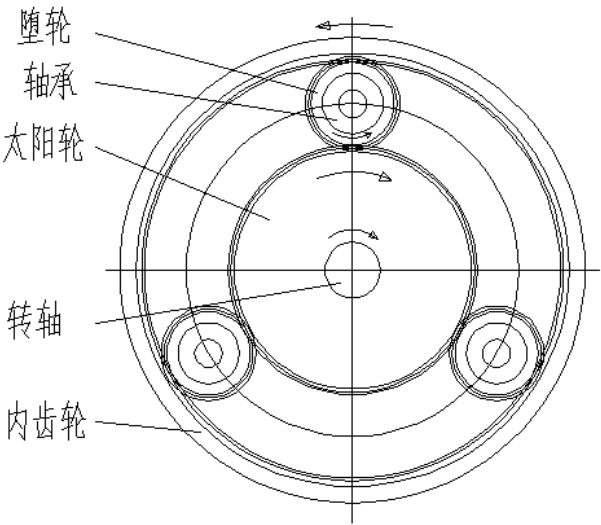


图 4.2.2 牵引状态原理

牵引状态时，电机带动转轴正时针旋转，从而带动太阳轮正时针旋转。此时堕轮逆时针旋转，从而带动内齿轮逆时针旋转。在这个状态中。滚珠止逆器外圈相对于内圈逆时针旋转，故而内外圈运转无阻碍。即牵引状态时，内齿轮以设定的减速比进行卷绳牵引。牵引完毕后电机断电。此时收卷轮受到重力作用逆时针旋转。从而带动内齿轮顺时针旋转。当内齿轮顺时针旋转时，堕轮顺时针旋转，从而带动太阳轮逆时针旋转。此时滚珠止逆器的外圈顺时针旋转，而内圈逆时针旋转。以内圈作为相对静止坐标系，则滚珠止逆器处于内圈静止而外圈顺时针运转状态。即属于内圈固定时，外圈具有顺时针转动趋势时，内外圈锁死形成一个整体保持相对位置不变的状态。此时滚珠止逆器阻止内外圈的相对运动，从而实现自锁。

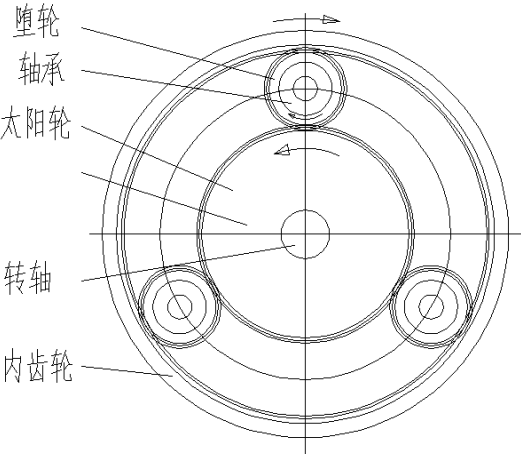


图 4.2.3 牵引状态原理

根据以上的设计原理，我们成功设计出了项目所需的拉升动力机构，其结构如图 4.2.4-图 4.2.8 所示。

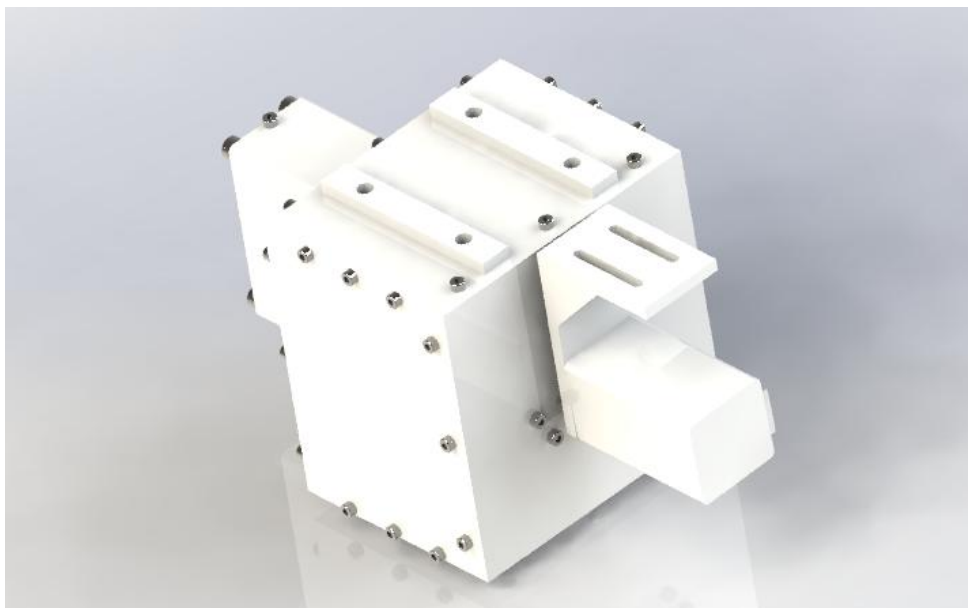


图 4.2.4 拉升动力机构外观图

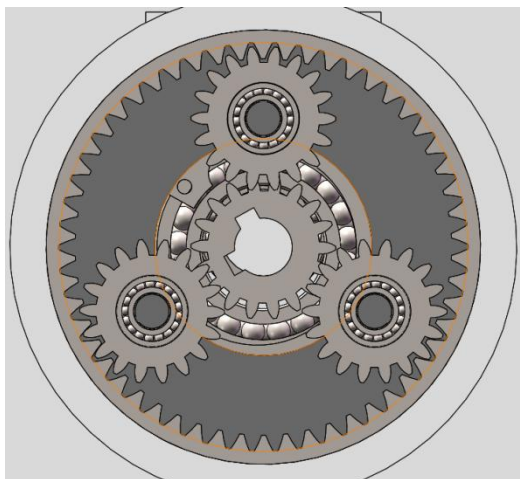


图 4.2.5 减速齿轮

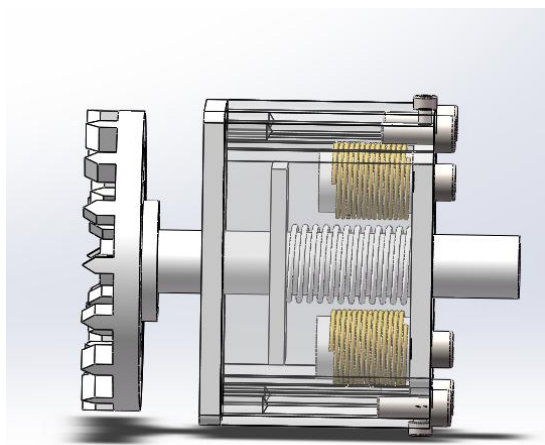


图 4.2.6 电磁铁锁紧装置

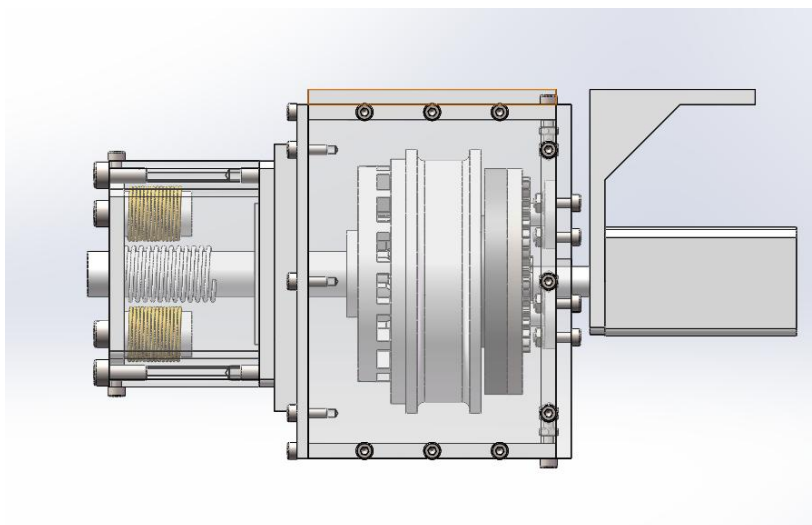


图 4.2.7 内部结构图

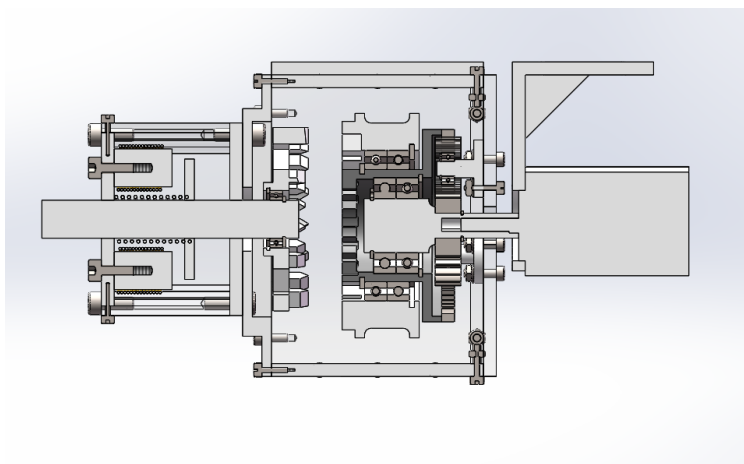


图 4.2.8 结构剖面图

4.3 剪叉机构

本项目中剪叉机构起着安装围网形成围笼且安全平稳放下底部框架的作用，同时剪叉机构可以提升整个抓捕机构的稳定性，防止整个抓捕机构在无人机飞行过程中摆动幅度过大造成飞行不稳的问题。我们通过查阅资料以及参考市面上现有的剪叉机构，设计出了本项目所需的行程为 800mm 的剪叉机构，在剪叉机构连杆的设计上加入了加强筋的设计，增强了剪叉装置整体的强度。



图 4.3.1 剪叉机构

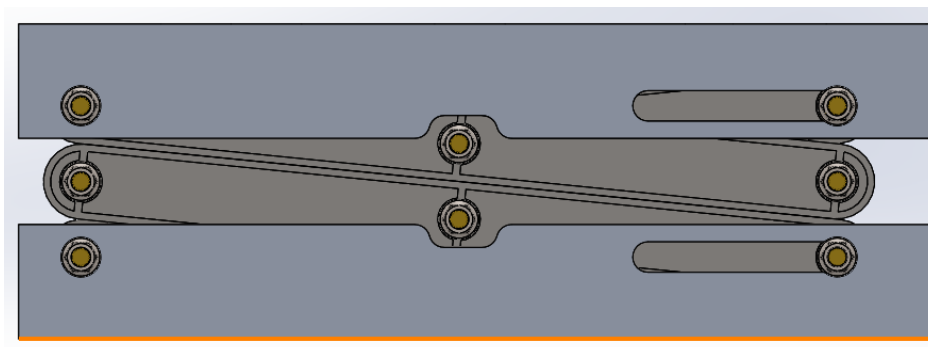


图 4.3.2 收紧时的剪叉机构

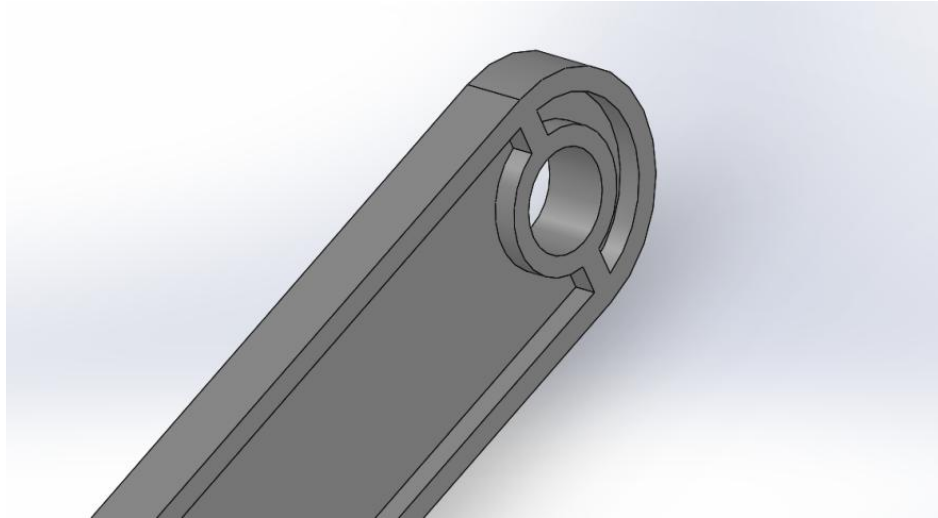


图 4.3.3 连杆的加强筋设计

4.4 底部框架机构

底部框架机构是一个由碳纤维框架、卷网机构、牵引电机、拉升滑轮、导轨、挂网环、拉杆组成的整体。采用碳纤维管拼接成的框架在保证强度的同时又大幅减轻了重量，由于采用了碳纤维管作为基本框架，不便于安装其他部件，于是设计了一种如图 4.4.2 的管夹具部件来安装其他的部件，图 4.4.3 所示的拉升滑轮与拉升动力机构中的收卷轮组成滑轮组用以拉升底部框架，卷网机构、牵引电机、导轨、拉杆组成的底部网整体，在四周围网将目标无人机包围后，牵引电机牵引拉杆，将网从卷网机构中快速拉出，沿着导轨移动，将无人机封闭在网内，若抓捕失败，电机停止牵引，卷网机构将网卷回，以便进行下次抓捕。



图 4.4.1 底部框架机构

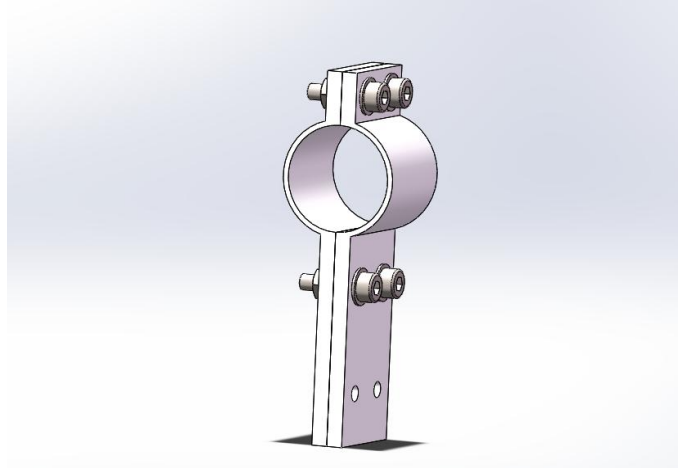


图 4. 4. 2 管夹具

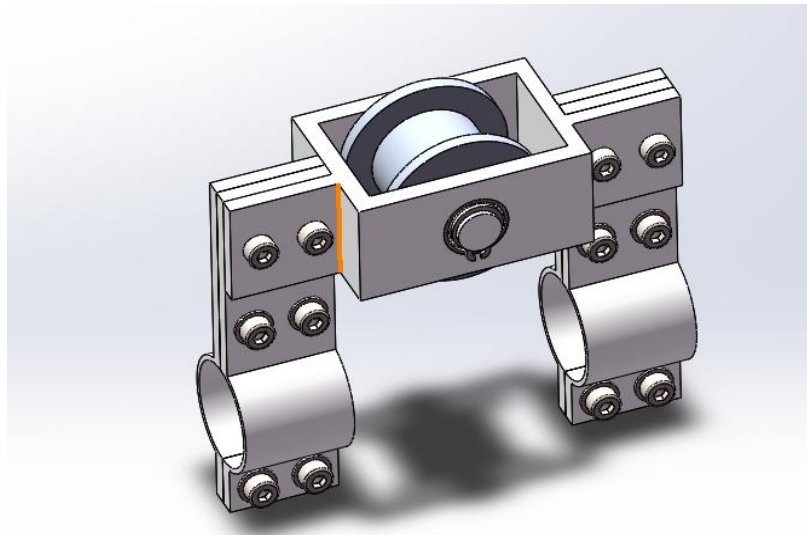


图 4. 4. 3 拉升滑轮

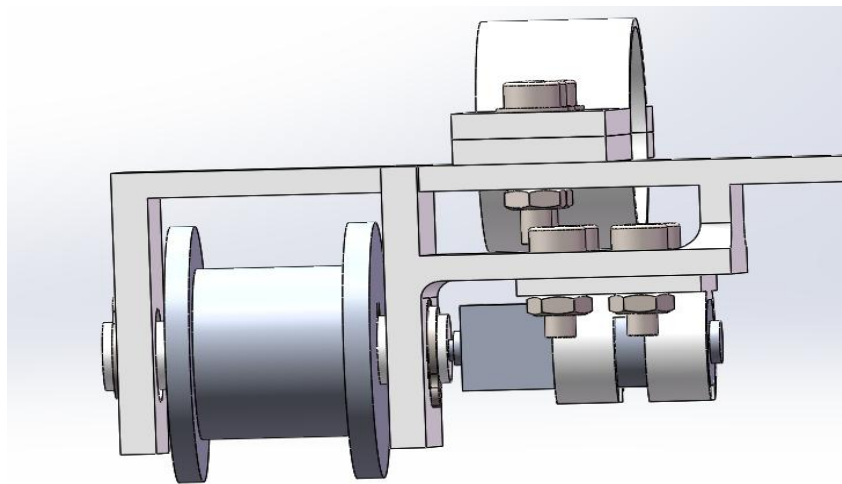


图 4. 4. 4 牵引电机及滑轮

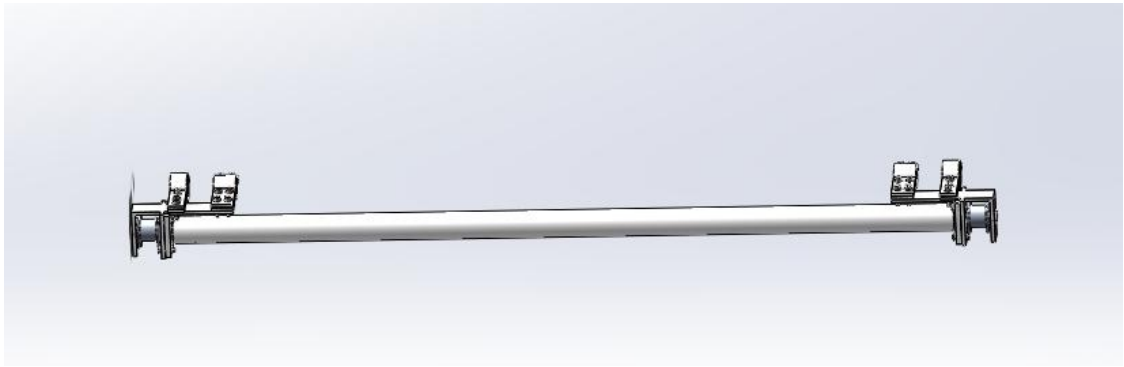


图 4. 4. 5 卷网机构

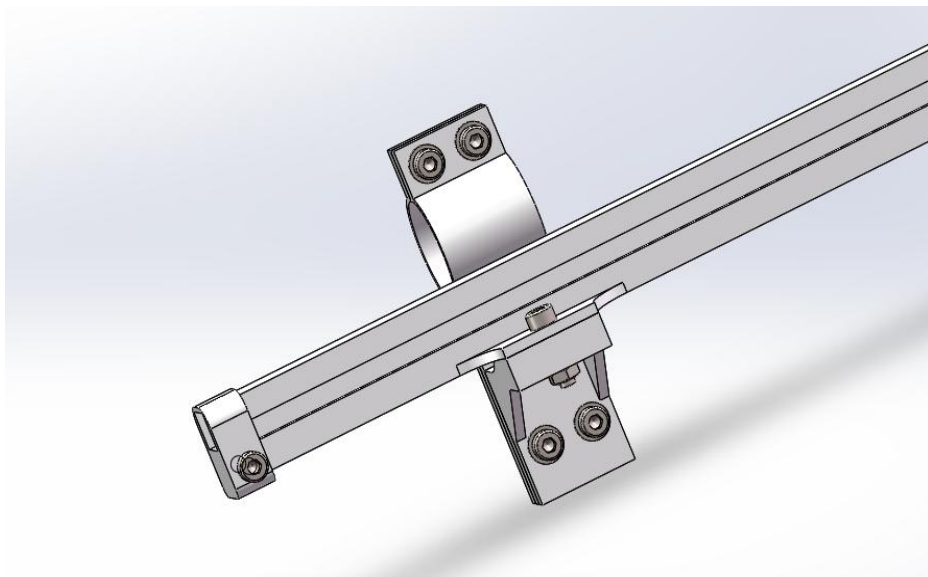


图 4. 4. 6 导轨

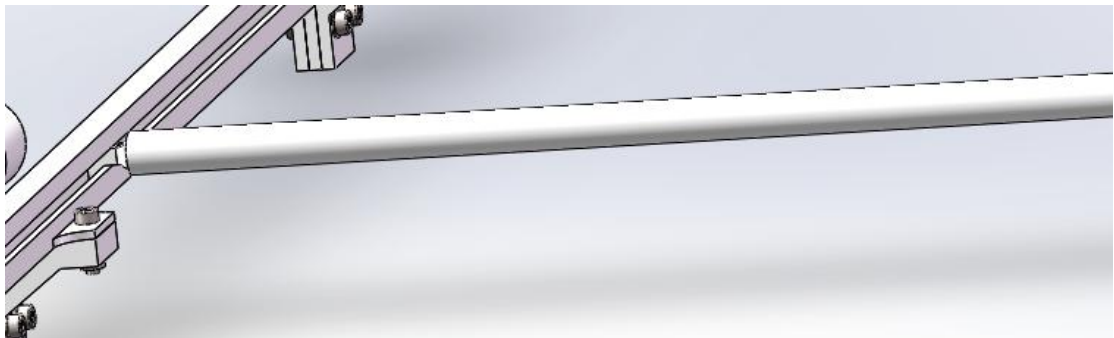


图 4. 4. 7 拉杆

4. 5 安装结构

除了上述四个主要机构外，抓捕机构还有安装结构用以安装这些部件，图 4. 51 所示为挂架，用以安装拉升动力机构、剪叉机构、网绳以及连接无人机，图 4. 5. 2 所示剪叉与底框连接机构用于连接剪叉机构和底部碳纤维框架结构。



图 4.5.1 挂架

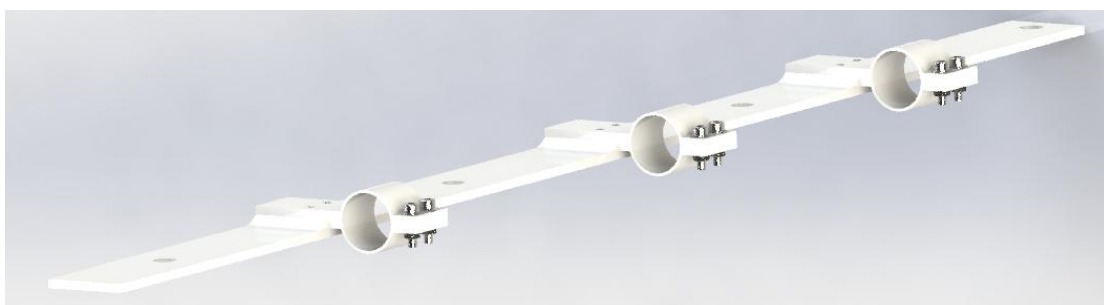


图 4.5.2 剪叉-底框连接机构

4.6 整体结构

将上述五个部件拼接起来，便得到我们最后如图 4.6.1 所示的抓捕机构

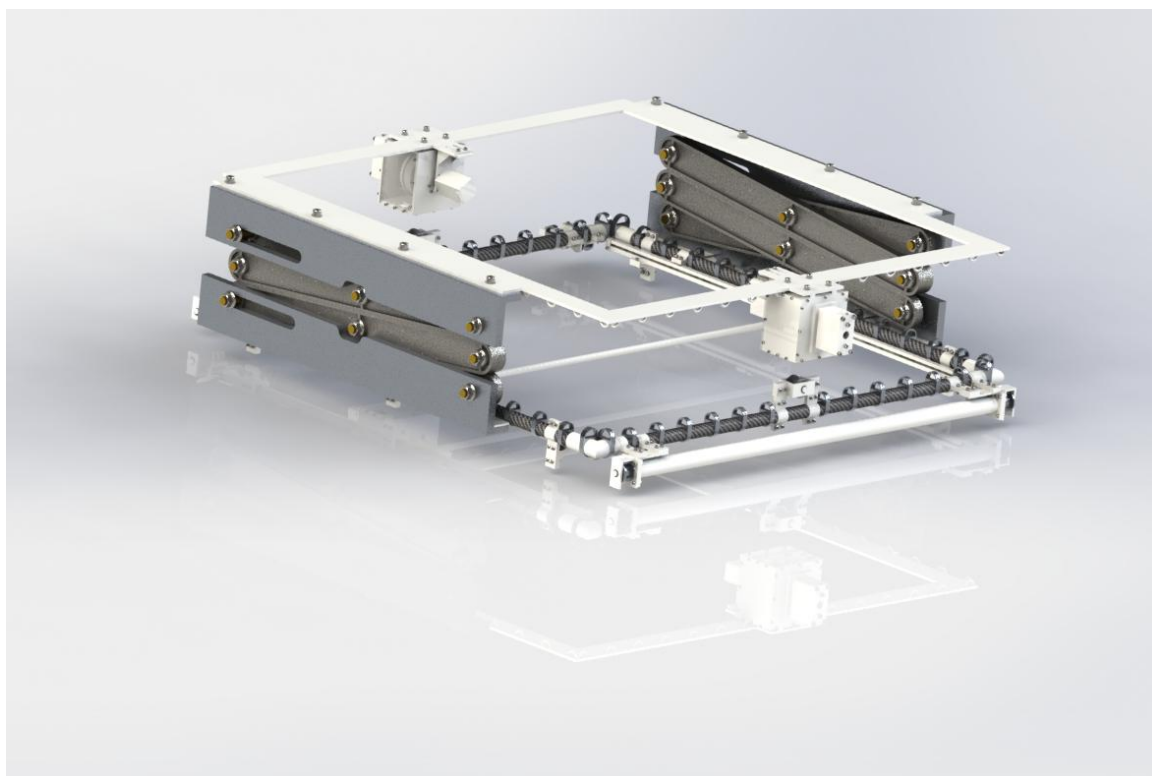


图 4.6.1 总装图

5. 选型、设计与校核

在前面已经提到，整个系统被分为4部分，分别为：网、底部机构、剪叉机构以及拉升动力系统。在这节中，将分别对这四部分部件进行选型、设计与校核。

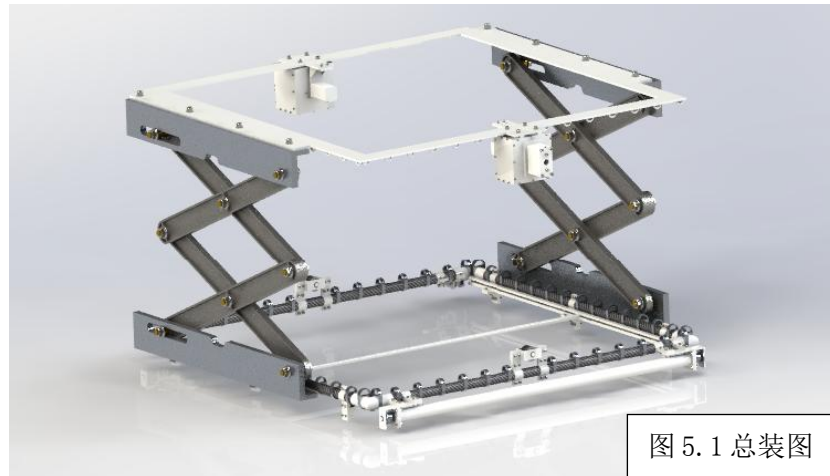


图 5.1 总装图

第一部分：网

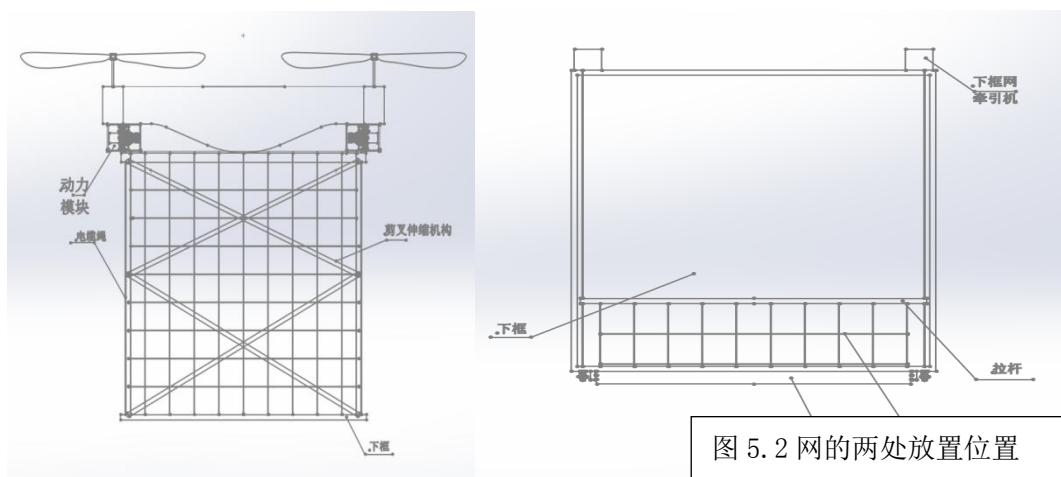


图 5.2 网的两处放置位置

在系统使用过程中，网可能会出现以下两种失效模式：

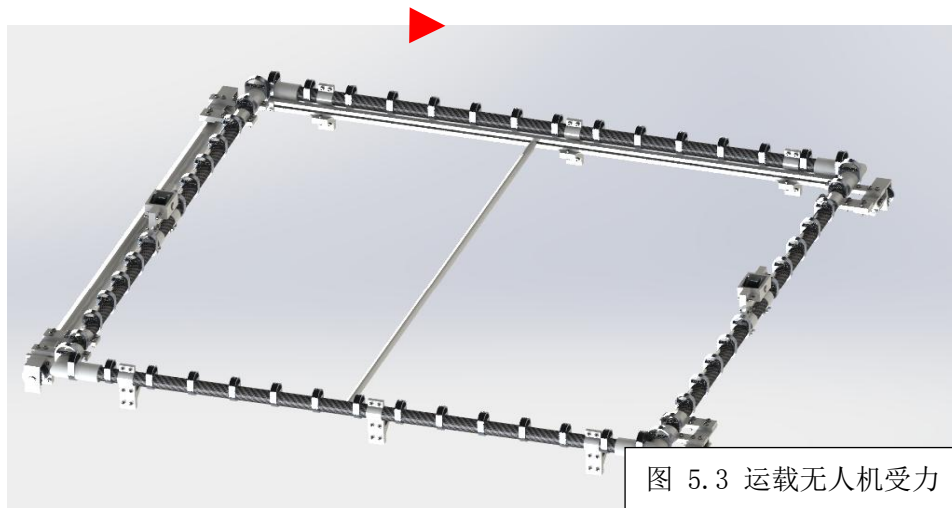
- 因网孔尺寸过大，无法对小尺寸无人机进行有效阻拦
- 无人机对网造成的力过大导致网损坏

为了防止以上两种情况的出现，在第一部分的核算中，我们首先分析了网可能的受力情况，接着根据受力情况及材料性质求出对网尺寸的要求，最后根据计算结果进行选型。

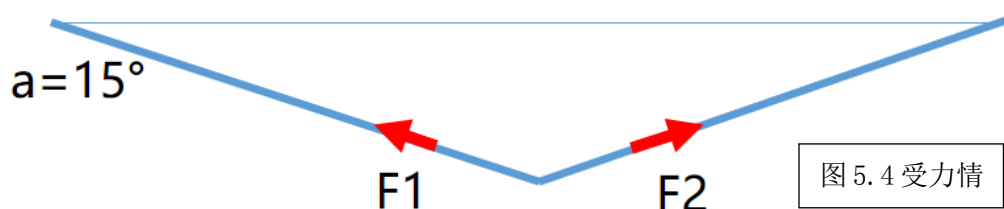
5.1 网受力

5.1.1 运载无人机的拉力

当捕捉成功时，无人机停在底部网上，此时需要通过网给被捕捉的无人机提供重力以及运动的加速度。此时无人机所在位置如图 5.3 所示。



假设网在受力 F 后发生形变, 形变后受力如图 5.4 所示, 下沉角度 $\alpha=15^\circ$ 。



最大合力:

$$F_0 = mg + ma$$

取 DJI Inspire 无人机的质量:

$$m = 4\text{kg}$$

假设最大加速度:

$$a = 4\text{m/s}^2$$

设有 15 根绳与两侧接触:

$$F_1 = F_2 = F_0 / (15 \times 2 \times \sin 15^\circ) = 8\text{N}$$

根据计算可知在这种情况下每根绳所受的力约为 8N。

5.12 无人机之间的短时相对运动冲力

在正常情况下, 两无人机在整个抓捕过程中相对静止, 当出现以下情况时, 两无人机可能会出现相对速度导致碰撞而产生短时冲力(图 5.5 为此时受力情况, 设角度为 15°):

- 无人机本身飞行误差
- 未准确测量被捕捉机器的速度
- 动力系统差别

当以上误差发生时, 相对速度较小, 设为 1m/s 。

相对速度:

$$V = 1\text{m/s}$$

设冲撞时间:

$$t \approx 0.1\text{s}$$

取 DJI Inspire 无人机质量:



图 5.5 冲撞受力

$$m=4\text{kg}$$

根据动量守恒：

$$F_3 \cdot t = m \cdot v$$

$$F_3 = F_4 = 5.7\text{N} < F_1$$

可知在无人机意外出现小量速度而导致冲撞时，绳受到的拉力小于运载无人机时所需的拉力 F_1 ，故取较大值 $F_1=8\text{N}$ 作为标准进行设计。

网最大受拉力为 8N ，选取常用材料尼龙（PA6）作为网的材料，取其抗拉强度为 $74 \sim 76\text{Mpa}$ 。则尼龙网中每根绳直径应满足以下要求：

$$D_0 \geq \sqrt{\frac{4F}{P\pi}} = 0.369\text{mm}$$

根据以上计算，可知当网绳直径大于 0.369mm 时，绳子在使用过程中不会被拉断。

5.13 无人机与网的剪切与挤压

被捕捉无人机桨叶有一定概率剪切捕捉网，在这种状态下：

- 设定无人机电机堵转扭矩
- 当桨叶被堵转且网刚好被切断时，切割点与电机旋转的距离小于可接受值
- 取可接受值 d 为 5mm （由于螺旋桨底部连接电机，故在看可接受值范围内的桨叶几乎不能与网产生剪切作用，图 5.6 为可接受值示意图）

图 5.6 可接受值示意图



电机功率与转速的关系：

$$P = T \times n / 9550$$

设电机参数如下：

- KV880
- 最大功率： 200W
- 额定电压： 11.1V

最大扭矩：

$$T_{\max} = 0.2\text{N} \cdot \text{m}$$

剪切面积：

$$\pi \times D^2 \div 4$$

剪切强度：取 25Mpa

$$D_1 \geq \sqrt{\frac{4T}{\pi d P}} = 1.43\text{mm}$$

则可知，当直径大于 $D_1=1.43\text{mm}$ 的网被螺旋桨剪切时，大概率不会被切断。

另外, 由于螺旋桨与网接触面积较小, 可能会出现局部挤压应力过大的情况, 此时我们通过以下方式求出最小直径要求:

- 取挤压应力最大值
- 求能满足挤压应力的网绳直径
- 取可接受值 d 为 5mm

设电机参数如下:

- KV880
- 最大功率: 200w
- 额定电压: 11.1V

$$T_{\max} = 0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$F_{\max} = 40 \text{ N}$$

桨叶厚度 h : 取 1mm

挤压强度: 取 31Mpa (PA6)

$$D2 \geq \frac{F}{Ph} = 1.29 \text{ mm}$$

$$D1 > 1.43 > D2 > D0$$

综合以上计算, 可以看出, 当 $D > 1.43 \text{ mm}$ 时, 尼龙网既不会被挤压破坏, 又不会被剪切与拉伸破坏。

5.2 网选型

目前市面上较普遍的尼龙网有以下三种尺寸:

尼龙网尺寸	
边长 30mm	粗 4mm
边长 50mm	粗 5mm
边长 100mm	粗 10mm

考虑到被捕捉无人机的尺寸, 最小约 143*143*55mm (DJI SPARK 无人机), 边长 100mm 的网对此类小型无人机的支持性较差, 故选取边长 50mm, 粗 5mm 的尼龙网作为首选网, 其直径 5mm $> 1.43 \text{ mm}$ 。

第二部分: 底部机构

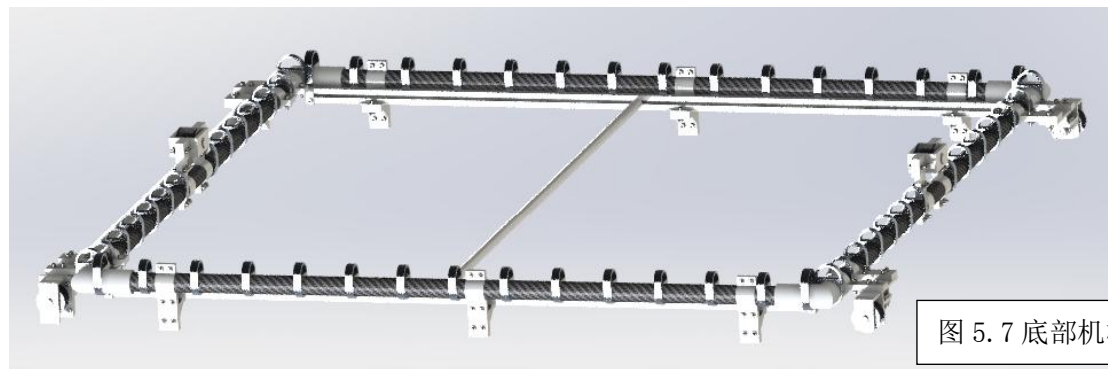


图 5.7 底部机构

如图 5.7 所示, 底部机构包含以下部分: 1. 底部框架 2. 卷网机构 2.1 弹簧 2.2

电机 2.3 轴承。在系统工作中，可能导致失效的原因有以下几种：

- 框架受力过大导致损坏
- 弹簧不能将卷网收回
- 电机导致卷网速度过慢从而抓捕失败
- 轴承受力导致损坏

针对以上几种可能的失效模式，在本部分中，我们把底部机构分为底部框架和卷网机构分别计算。首选分析底部框架的受力情况，紧接着选取框架的材料，计算框架尺寸。然后对卷网机构中的弹簧、电机进行选型并计算卷网时间，最后对卷网机构中的轴承进行选型。

5.3 底部框架

5.3.1 框架受力

尼龙网受力已知，由于力最终传递到框架上，故框架受力已知，即当受力最大时，框架两侧每侧有 15 个受力点，每个点受力 8N，力的方向与框架平面成 15° 夹角，受力如图 5.8 所示（由于网由滑杆带动进行卷网，两侧均无法对其提供拉力，故仅有卷网机构两侧受拉力）。

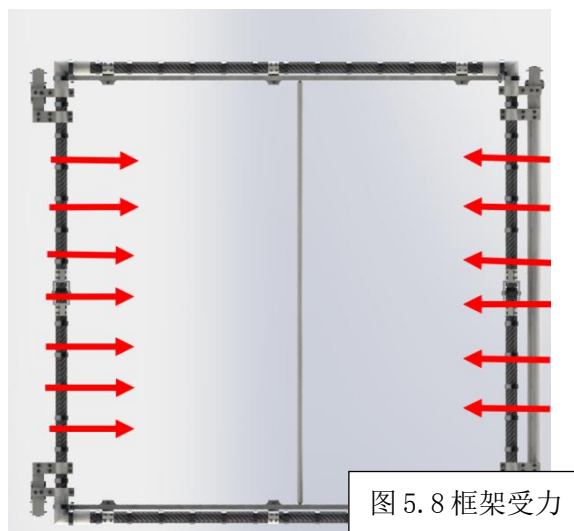


图 5.8 框架受力

对于主要受拉力的左右两杆，总受力情况如图 5.9 所示，其中拉力的间隔为 5cm；弯矩分布图如图 5.10 所示，其最大弯矩为 $1280\text{N}\cdot\text{cm}$ ；轴向力为图 5.11，整杆无轴向力；剪力为图 5.12，最大剪力为 60N。

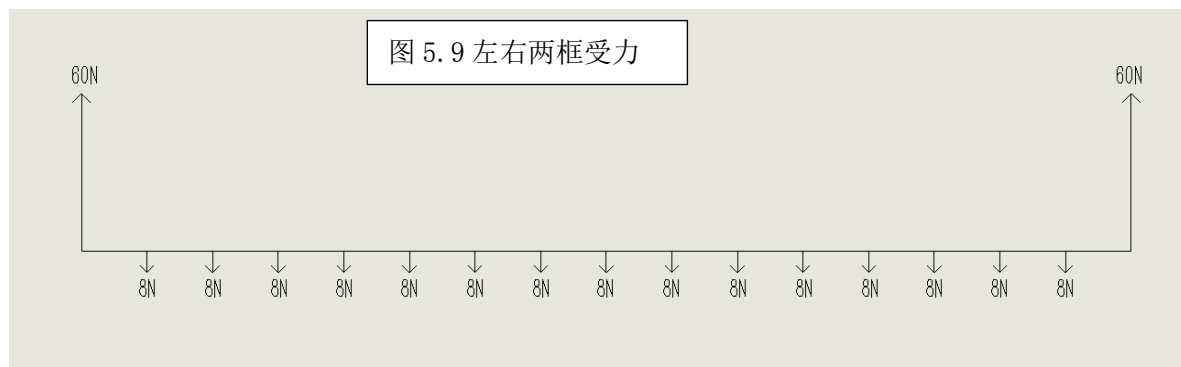


图 5.9 左右两框受力

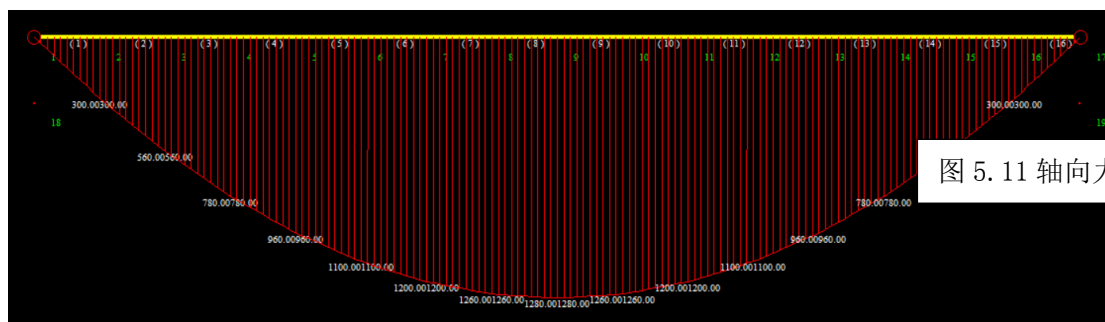


图 5.11 轴向力

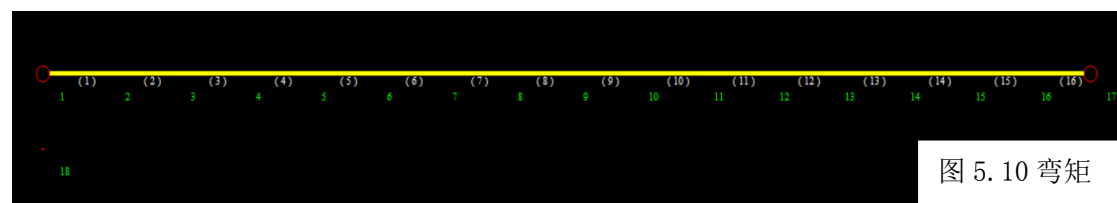


图 5.10 弯矩



图 5.12 剪力

对于上下两侧杆，总受力情况如图 5.13 所示（设每杆重 400g）；弯矩分布图如图 5.14 所示，其最大弯矩为 438N*cm；轴向力为图 5.15，最大轴向力为 68.08N；剪力为图 5.16，最大剪力为 17.53N。

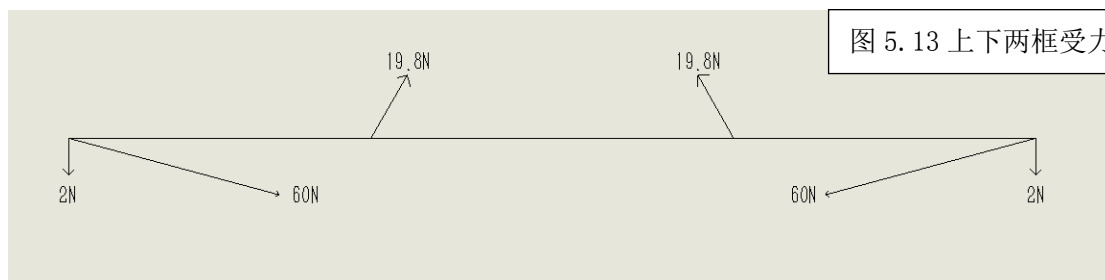


图 5.13 上下两框受力

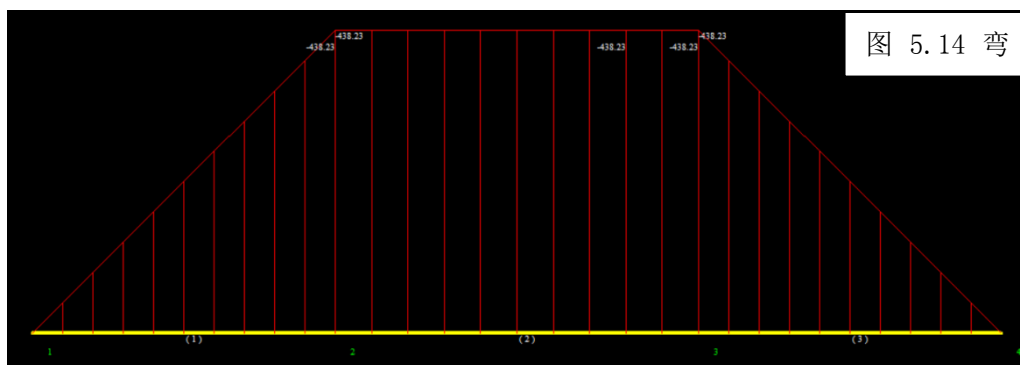


图 5.14 弯

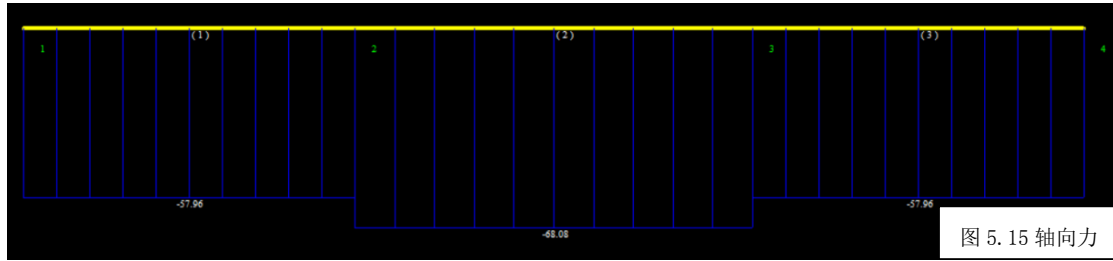


图 5.15 轴向力

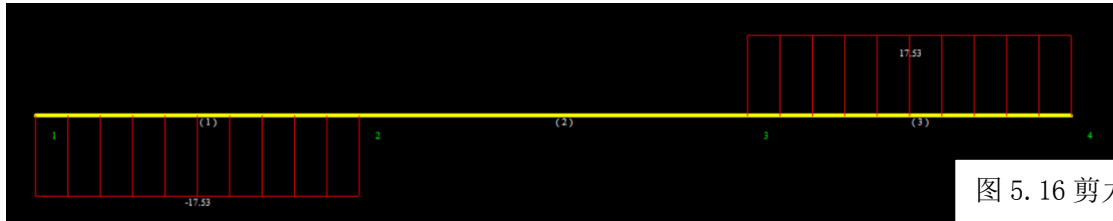


图 5.16 剪力

5.32 框架材料选取与尺寸设计

根据上一节的计算, 并结合各杆完全一致的设计条件, 取上述计算结果的最大值作为设计参数。

- 最大弯矩: 1280N*cm
- 最大剪力: 60N
- 最大轴向力: 68N

由于无人机载荷限制, 对系统质量要求较高, 故首先选取低密度的 POM 作为底部框架材料进行尝试。同时, 考虑到杆件上需有足够的空间安装滑轨及挂钩, 选用空心管的结构。

取压缩强度: 60Mpa,

$$S_{min1} = 68N / 60Mpa = 1.1 \times 10^{-6} m^2$$

取弯曲强度: 88Mpa,

$$W_Z = (\pi D^3) / 32 (1 - \alpha^4), W = M / \sigma, \text{取 } \alpha = 0.8, \text{推出 } D > 13.6mm$$

取剪切强度为: 30Mpa,

$$S_{min2} = 60N / 30Mpa = 2 \times 10^{-6} m^2 > S_{min1}$$

由于杆件上需有足够的空间安装滑轨及挂钩, 同时需要一定的强度冗余, 选取外径 $D=20mm$, 内径 $d=16mm$ 进行设计, 此时截面积为 $1.1 \times 10^{-4} m^2 \gg S_{min}$, 同时也满足 $D > 13.6mm$ 以及 $\alpha=0.8$ 的条件。

5.4 卷网机构

5.41 弹簧选型

当网收回时, 卷网机构工作, 弹簧将网收回。此时, 由于仅需克服导轨滑动摩擦力, 故力的需求为小量。选取涡卷弹簧作为卷网弹簧 (涡卷弹簧一般用于卷尺等设备上, 如图 5.17 所示)。

图 5.17 涡卷弹簧



5.42 电机选型与卷网时间

电机需提供的力包括：

1. 弹簧的拉力
2. 滑动摩擦力

均为小量，为降低设计质量，选取小型直流电机拉动卷簧。

卷网机构周长 62.8mm，则需转动 13 圈可将网完全拉出，设拉出时间 < 2s, 则电机转速 $n > 390$ 圈/分钟，取 480 转/分钟，则此时，所选电机参数如下表, 电机如图 5.18 所示：

电压 DCV	空载转速 rpm\min	负载转速 rpm\min	额定力矩 kg\cm	额定电流 MA	堵转力矩 kg\cm	堵转电流 MA	减速比 1:00
12	600	480	0.40	300	3.20	300	50

全新N20减速马达



图 5.18 卷网电机

金属齿轮正反转

5.43 轴承选型

由于此处轴承(轴承位置如图 5.19 所示)仅受径向载荷或轴向载荷相对可忽略，则有：

$$P = F_r = 60N$$

所需的径向基本额定动载荷：

$$C_r = \frac{f_p \times P}{f_t} \left(\frac{60n}{10^6} L_h \right)^{\frac{1}{e}}$$

由于属于轻微冲击， f_p 取 1.1；轴承工作温度为室温， f_t 取 1。

设最大转速 $n = 600$ 转/分，使用寿命 $L_h = 5000h$ 。

$$C_r = \frac{f_p \times P}{f_t} \left(\frac{60n}{10^6} L_h \right)^{\frac{1}{e}} = \frac{1.1 \times 60}{1} \left(\frac{60 \times 600}{10^6} \times 5000 \right)^{\frac{1}{3}} = 372.65N$$

轴径 6mm，查机械设计手册，选取 628/6 轴承，其 $C_r = 1080N > 372.65N$



图 5.19 轴承位置

剪叉机构

剪叉机构连接了底部机构与上部的无人机，是系统主要的结构部件之一。在这部分中，剪叉机构可能由于应力过大导致过量形变甚至损坏而失效。为防止系统出现这个问题，我们首先选取了剪叉机构的材料，接着对机构进行了静力学的仿真，从而保证了剪叉机构的力学性能。

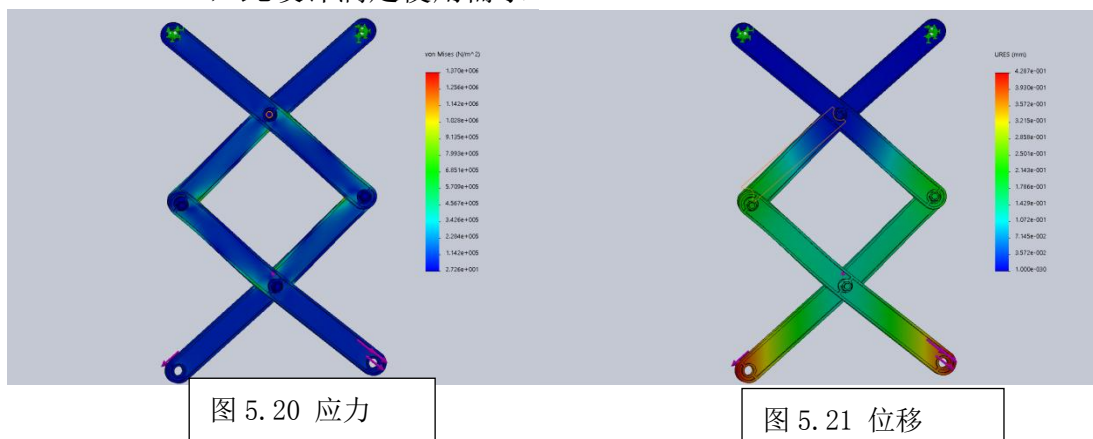
5.5 材料选取

材料：为降低质量，选取 POM 进行尝试。

5.6 仿真校核

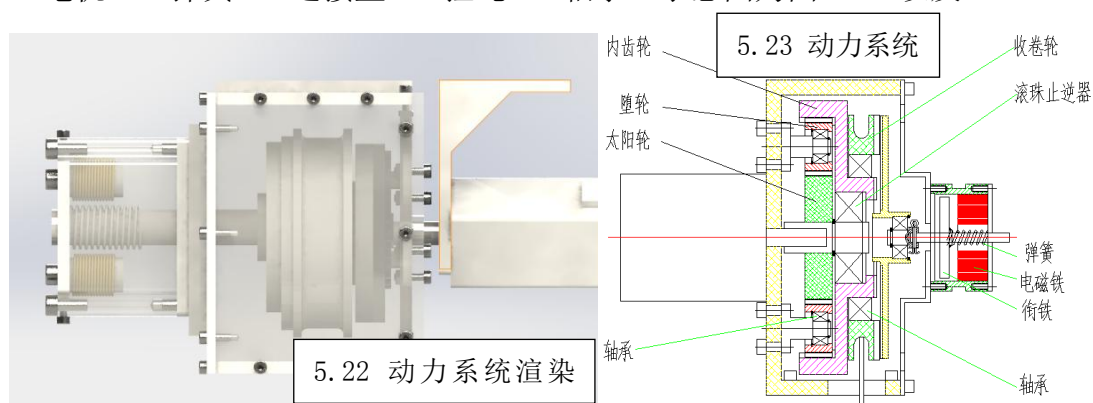
算例设置：上方两孔固定，下方施加静力（19.8N）

结果：如图 5.20 以及 5.21 所示，最大应力 $<1.37 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ；最大位移 $<4.3 \times 10^{-1} \text{ mm}$ ，此设计满足使用需求



拉升动力系统

拉升动力系统主要包含以下部分：1. 减速齿轮组 2. 弹簧 3. 电磁铁&衔铁 4. 电机 5. 弹簧 6. 连接盘 7. 拉绳 8. 轴承。示意图为图 5.22 以及 5.23。



在系统工作时，可能有如下情况导致系统失效：

- 电机及齿轮组不能提供足够回收力
- 电磁铁不能将链接盘吸回
- 连接盘受力过大而损坏
- 拉绳被拉断

● 齿轮组强度差导致损坏

为避免以上情况出现,在这一节将对动力系统进行核算。我们把这一节分为两部分。第一部分为电机以及齿轮组,在这部分中首先了解我们对系统的动力需求,接着进行电机的选型,根据以上两条件选取合适的传动比,最后设计齿轮的具体参数以及进行材料的选取。第二部分为其他的附属部分,包括连接盘的设计,电磁铁和弹簧的选型以及拉绳的选型。

*备注: 由于动力系统轴承理论上无径向与轴向力,不进行校核,在结构设计时直接按照尺寸需要进行选型。

5.7 电机与齿轮组

5.7.1 动力需求

设剪叉机构及下框整体质量 $\leq 3\text{kg}$,则剪叉机构上两个电机,每个需提供的拉力 $F \leq 15\text{N}$ 。

5.7.2 电机选型

为减轻质量,在此处选择常用步进电机中最小的 28 步进电机,并使用齿轮组进行减速。步进电机的结构如图 5.24 所示,电机参数如图 5.25 所示,从表中可以看出,此电机的最大保持转矩为 $0.18\text{N}\cdot\text{m}$ 。

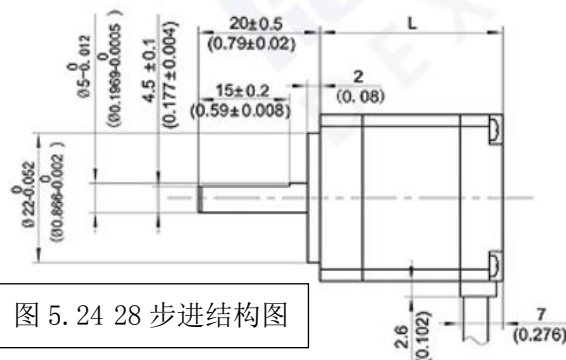


图 5.24 28 步进结构图

型号 MODEL	保持转矩 HOLDING TORQUE		额定电流 RATED CURRENT		相电阻 RESISTANCE		相电感 INDUCTANCE		引线数 LEAD WIRES (PINS)		转动惯量 ROTOR INERTIA		重量 MASS		厚度 L	
	N·m	oz-in	A/PHASE	Ω/PHASE	mH/PHASE						g·cm ²	oz-in ²	kg(lb)		mm(inch)	
28HB30-401A	0.07	10	0.6	6.7	5.0	4	9	0.05	0.1 (0.22)	30 (1.18)						
28HB30-402A			1.0	2.4	1.8											
28HB40-401A	0.12	17	0.6	9.3	7.5											
28HB40-402A			1.0	3.3	2.7											
28HB50-401A	0.18	25.6	0.6	12.5	11.0		18	0.10	0.2 (0.44)	50.5 (1.99)						
28HB50-402A			1.0	4.4	4.0											

图 5.25 电机参数

5.7.3 齿轮组传动比

设收卷轮直径 5cm 则收卷时扭矩约为:

$$0.025\text{m} \times 15\text{N} = 0.375\text{N}\cdot\text{m}$$

传动比需求约为:

$$0.375 / 0.18 = 2.1$$

考虑当无人机加速上升时收回剪叉机构的工作情况,设最大加速度为 3m/s^2 ,效率 0.97,传动比需求为:

$$0.4875 / 0.18 / 0.97 = 2.79$$

综上,取传动比为 1:3

5.74 齿轮设计与材料选取

已取传动比为 1: 3, 则根据齿轮组结构, 太阳轮的外径 d_1 与内齿轮的内径 d_2 之比为 1: 3, 堕轮直径与太阳轮直径之比为 1: 1。齿轮按 7 级精度制造 (减速器齿轮)。齿宽系数取 0.3 (悬臂布置, 软齿面)。载荷系数 K 取 1.2 (载荷均匀)。安全系数 S_H 取 1.25, S_f 取 1.6 (失效概率 $< 1/1000$)。选取 45 钢 (常用低载荷齿轮材料) 作为齿轮材料进行设计, 材料参数如下表所示:

	45
弹性系数/Gpa	210
泊松比	0.3
硬度/HBS	156~217 (软齿面)
接触疲劳极限/Mpa	350~375
弯曲疲劳极限/Mpa	280~340

*转矩不大时, 一般选用碳素结构钢。

此时, 弹性系数为: $Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}}$ $Z_E = 191.65 \sqrt{Mpa}$

接下来, 首先根据齿轮齿面接触强度进行齿轮参数的选取, 再进行齿轮弯曲强度的验算。

齿轮齿面接触强度计算:

太阳轮与堕轮的接触:

$$d_1 \geq 2.32 \times \sqrt[3]{\frac{1.2 \times 60 (1+1)}{0.3} \left(\frac{191.65}{360 \div 1.25} \right)^2} = 13.47mm$$

齿宽: $b = \delta \cdot d_1 = 4mm$ 取 $d_1 = d_2 = 8mm$

模数: $m = d_1 / z_1 = 9.27 / \text{齿数}$

模数取 1, 齿数应不小于 17, 选取 $m=1$, 齿数 $z_1 \ll z_2 = 18$ (此时满足三堕轮安装条件), 此时, $d_1 = 18mm$ 。

堕轮与内齿轮:

$$d_2 \geq 2.32 \times \sqrt[3]{\frac{1.2 \times 60 (3-1)}{0.3} \left(\frac{191.65}{360 \div 1.25} \right)^2} = 9.6mm$$

齿宽: $b_2 = \delta \cdot d_2 = 2.88mm$

模数: $m = d_2 / z_2 = 9.6 / \text{齿数}$

当 $b_2 = 18$, 齿数为 18, 齿宽 8mm 时, 满足以上条件, 此时, 选取 $b_3 = 3mm$, $z_3 = 3 \cdot 18 = 54$, $d_3 = 54mm$ 。

齿轮传动的轮齿弯曲强度验算

太阳轮与堕轮:

$$\sigma_{F1} = \sigma_{F2} = \frac{2 \times 1.2 \times 60 \times 3.07 \times 1.54}{8 \times 18 \times 1^2} 4.72 \ll 187.5$$

堕轮与内齿轮:

$$\sigma_{F2} = \frac{2 \times 1.2 \times 60 \times 3.07 \times 1.54}{3 \times 18 \times 1^2} = 12.61 < 187.5$$

$$\sigma_{F3} = 12.61 \times \frac{2.36 \times 1.7}{3.07 \times 1.54} = 10.69 \ll 187.5$$

则此齿轮组满足齿面接触以及齿轮弯曲强度的要求，均安全。下表为齿轮组各齿轮的最终设计参数以及材料和润滑油的相关信息：

	太阳轮	堕轮	内齿轮
模数	1	1	1
直径/mm	18	18	54
齿宽/mm	8	8	3
齿数/个	18	18	54
材料	45碳素结构钢，硬度<350HBS		
润滑油黏度 mm^2/s	288~352 @ 环境10~35℃		

5.8 其他部分

5.8.1 连接盘设计

连接盘在机构中的位置如图 5.26 所示，连接盘如图 5.27 所示。连接盘作为将变速箱输出转矩传递至收卷轮的重要部件，需要进行转矩传输时的受力校核。在本节，首先计算连接盘所受的转矩，再根据转矩来校核挤压以及剪切的强度。

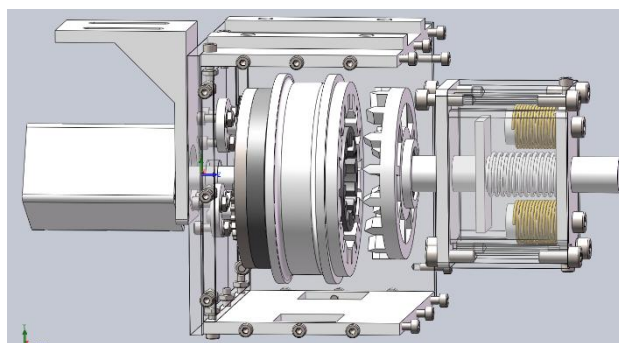


图 5.26 连接盘位置示意图

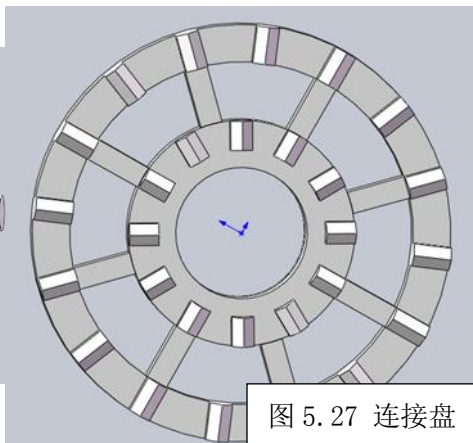


图 5.27 连接盘

由电机即传动比可知，连接盘需传输的最大转矩为 $0.54N \cdot m$ ，则大圆上的键每个承担转矩 $0.03375N \cdot m$ ，小圆上的键每个承担转矩 $0.045N \cdot m$ 。小圆上的键平均半径为 $13.5mm$ ，侧面面积为 $10mm^2$ ，切面面积为 $12mm^2$ 。大圆上键平均半径为 $26mm$ ，侧面面积为 $17.92mm^2$ ，切面面积为 $15mm^2$ 。

挤压强度校核：取 POM 作为此部件的材料，并取挤压强度为 $38Mpa$ 。

内圆键：

$$\sigma = \frac{2\tau}{DS_1} = 3.3 \times 10^5 Pa = 0.33Mpa \ll 38Mpa$$

外圆键：

$$\sigma = \frac{2\tau}{DS_1} = 7243 Pa \ll 38Mpa$$

均满足挤压受力条件。

剪切强度校核：取 POM 剪切强度为 $30Mpa$ 。

内圆键:

$$\sigma = 2\tau / (DS_2) = 2.8 \times 10^5 \text{ Pa} = 0.6 \text{ Mpa} < 30 \text{ Mpa}$$

外圆键:

$$\sigma = 2\tau / (DS_2) = 9.6 \times 10^4 \text{ Pa} < 30 \text{ Mpa}$$

均满足剪切受力条件。

综上, 可知, 这种连接盘机械结构符合转矩传输的要求。

5.82 电磁铁与弹簧选型

连接盘上的键最大长度为 8mm, 则电磁铁工作时, 吸引连接盘移动的最小距离为 8mm, 为保证安全, 取 10mm 进行设计。选取小型电磁铁如图 5.28 所示, 由于电磁铁吸力与距离的关系未知且受使用条件影响较大, 故需实验测量。

ELECALL® 伊莱科

直流电吸盘式电磁铁

✓电压DC12V

✓吸力1Kg



5.28 电磁铁

5.29 弹簧



当弹簧 (如图 5.29 所示) 将连接盘顶入进行配合时, 弹簧需提供预紧力, 预紧力需实验测定, 设预紧力为 F_1 , 电磁铁在 x 处时吸力为 F_x , k 为弹簧的弹性系数。则需满足以下条件:

$$F_1 + kx \leq F_x$$

5.83 拉绳选型

拉绳提供竖直向上的力, 将底部边框收回。共两根拉绳, 当拉绳受力最大时, 提供底部边框的力, 同时提供底部边框的向上加速度, 设最大加速度为 3 m/s^2 , 下框质量 $\leq 3 \text{ kg}$ 。则有:

$$F_{\max} = 0.5 \times (mg + ma) = 19.5 \text{ N}$$

当使用尼龙绳时, 尼龙 (PA6) 抗拉强度为 $74 \sim 76 \text{ Mpa}$ 。此时有:

$$P = F \div (\pi \times D^2 \div 4)$$

推出:

$$D = 5.8 \times 10^{-4} \text{ m}$$

D 即为最小直径。

取安全系数 $S=4$ (缆风绳一般不小于 3.5), 得

$$D_1 = 2.3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

取尼龙绳直径为 3mm。

6. 总结

在本次项目中，我们完成了无人机抓捕机构的设计工作（总装图如图 6.1 所示），整套系统实现预期目标（成功率较高，成本较低，可重复使用等）。系统的特性及部件组成如下表所示：

优缺点		成本	结构	成功率	使用难度	捕捉范围	设计难度
全机械抓捕		✓	✓	●	✓	-	✓
部件	卷网机构	剪叉机构拉伸动力系统			剪叉机构	网	框架

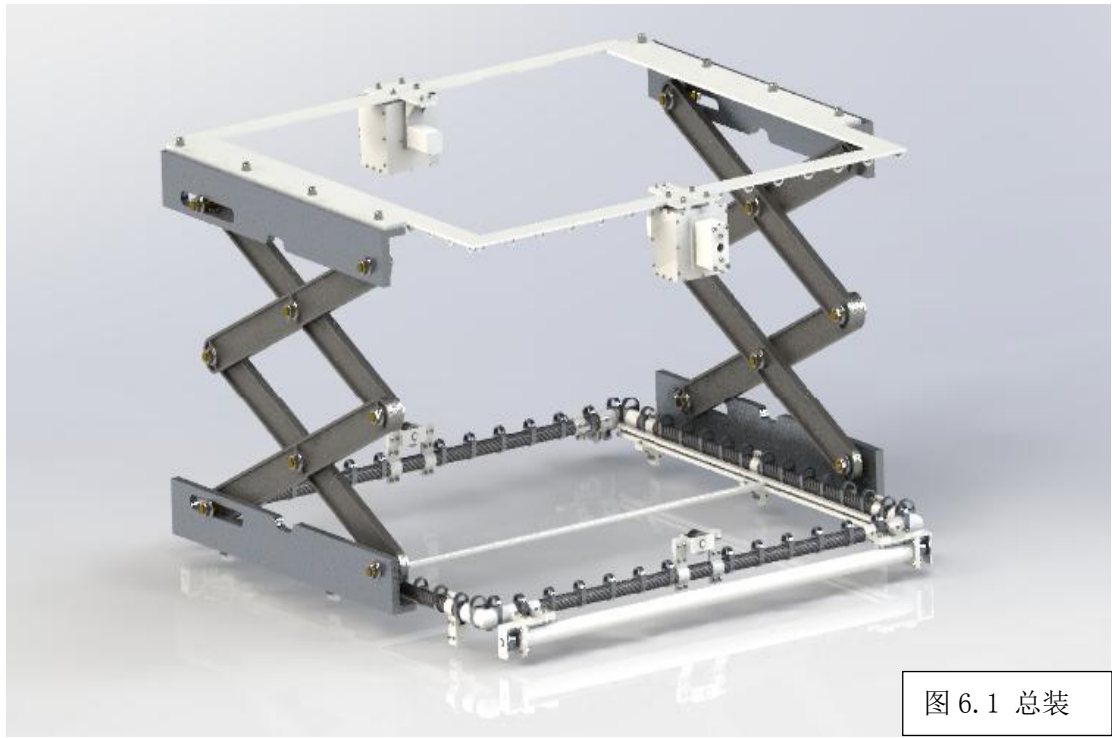


图 6.1 总装

但仍有部分部件可以进行后续的优化，以提高系统性能，减少成本等：

- 1. 部分设计在力学性能上冗余较多：
 - 齿轮组：因尺寸及平顺性要求，不能设计更小的尺寸致使其在力学性能上冗余较多，可尝试选取其他材料进行设计。
 - 连接盘：由于结构不确定性大，此处连接盘设计采用先预设尺寸再校核的方法，力学性能同样冗余较多，可进行结构优化。
 - 剪叉机构：由于受力较复杂，结构确定后使用力学分析校核，可优化尺寸减轻重量。
- 2. 参数选取
 - 由于资料较少，部分设计未选取合适的安全系数，可进一步选取合适的参数来优化设计。
 - 部分范围型系数，因无法准确把握最佳取值，可能会造成部分冗余。

参考文献

- 郭珊珊. (2016). 反无人机技术与产品发展现状. 军事文摘(19), 36-39.
- Anon, (2018). [online] Available at:
<http://free.chinabaogao.com/jiaotong/201712/122I104292017.html>
[Accessed 13 Jan. 2018].
- Sohu.com. (2018). 反无人机技术与产品发展现状. [online] Available at:
http://www.sohu.com/a/115809438_465915 [Accessed 13 Jan. 2018].
- 唐金松. (2004). 《机械设计手册》第3版. 中国机械工程(11), 947-947.
- 杨可桢. (2013). 机械设计基础(第六版). 高等教育出版社.