



课程论文

COURSE PAPER



论文题目：面向肯德基的餐食分装传送装置
设计说明书

学生姓名：谭正 耿梓航 赵启 汤逸磊 徐哲

课程名称：设计与制造 II

指导教师：盛鑫军

学院(系)：机械与动力工程学院

面向肯德基的餐食分装传送装置

设计说明书

摘要

目前肯德基门店存在高峰期店员收银与取餐任务重叠，操作效率不高，取餐等候时间长的问题。本项目旨在设计出面向肯德基的餐食分装传送装置，即一个四自由度机械臂加一自适应机械手，为肯德基目前存在的取餐效率不高和一人多职的问题提供一种模块化、成本低、易于在现有基础上改装的解决方案。制作出的装置能够在收到信指令后，转动到指定位置夹取汉堡、饮料、薯条，并放置到指定区域。本项目中设计一自适应结构来防止破坏食物完整；并在结构设计上力求降低重量和尺寸。

本设计说明书的内容包括引言、功能分解和总体设计思路、机械结构详细设计、模型的加工与装配、电路控制系统、总结与展望、致谢，共八章。本项目通过采访、实地调查确定意义性与可行性；通过理论计算、建模、仿真确定设计方案；通过机械加工与装配制作模型。

关键词：肯德基，餐食传送，五自由度机械臂，自适应

A DESIGN SPECIFICATION FOR THE FOOD-COLLECTING AND TRANSFERRING MANIPULATOR FOR KFC

ABSTRACT

Currently during rush hours, KFC staff often has to play the role of cashier and food collector at the same time, leading to poor efficiency and long waiting time. This project aims at designing a food-collecting and transferring equipment for KFC, which is a 4 DOF(Degree of Freedom) manipulator with an adaptive hand, providing a modular, low-cost and easily-modified solution to KFC's current problems. After receiving signals, the equipment can rotate and move its arms to reach hamburgers, soft drinks or french fries, clamp them, and move them to certain locations. This project involves an adaptive design to protect foods' appearance, and seeks to reduce weight and size. /protect // This design specification contains 8 chapters: introduction, function decomposition and overall design ideas, detailed structure design, physical model making and assembly, circuit control system, summary and prospect, and acknowledgement. This project's significance and feasibility are confirmed by interviews and field visits; final design scheme is based on theoretical calculation, 3D modeling, and simulation; physical model is made through machining and assembly.

Key words: KFC, food-collecting and transferring, 5 DOF manipulator, adaptive design

目 录

第一章 引言	1
1.1 立项背景	1
1.2 竞品分析	1
1.2.1 (CN207943221) 一种快餐自动打包机	1
1.2.2 (CN105836207) 模块化快餐自动打包机	2
1.2.3 (CN109903461) 自动快餐贩卖机	2
1.3 项目任务书	3
1.3.1 题目：面向肯德基的餐食分装传送装置	3
1.3.2 项目方案简介	3
1.3.3 项目预期目标	3
1.3.4 任务	3
1.3.5 成果呈现方式	4
1.3.6 项目起止时间：2019.9.27 至 2020.1.11	4
第二章 功能分解和总体设计思路	5
2.1 功能分解	5
2.1.1 接收和分析指令	5
2.1.2 夹取不同的工件	5
2.1.3 移动工件	5
2.2 运动转换的基本功能和传动、减速机构的选型	6
2.2.1 运动类型的转化	6
2.2.2 机构选型总思路	6
2.3 工作流程	6
第三章 机械结构详细设计	9
3.1 机械臂	9
3.1.1 粗略计算	9
3.1.2 机构选型	10
3.1.3 轴的设计和验算	12
3.1.4 云台主轴的有限元分析	14
3.2 自适应末端执行机构	16
3.2.1 下层传动模块	16
3.2.2 换向夹取模块	20
3.2.3 强度校核	24
第四章 零件的选择、加工与机构装配	27
4.1 零件材料的选择及加工	27
4.1.1 材料的选择	27



4.1.2 零件的加工	27
4.1.3 加工中遇到的问题及解决方法	27
4.2 机构的装配	28
4.2.1 基座的装配	28
4.2.2 机械臂的装配	29
4.2.3 机械手的装配	30
 第五章 机电控制系统	31
5.1 电机选型	31
5.2 驱动器选择	33
5.2.1 步进电机驱动	33
5.2.2 直流电机驱动	33
5.3 电源选择	33
5.3.1 供 DM542 驱动器	33
5.3.2 供 DM542C 驱动器	34
5.3.3 供 L298N 驱动器	34
5.4 传感器选择	34
5.5 控制板选择	35
 全文总结	37
 参考文献	39
 致 谢	41

插图索引

图 1-1 竞品分析-一种快餐自动打包机	1
图 1-2 竞品分析-模块化快餐自动打包机	2
图 1-3 竞品分析-自动快餐贩卖机	2
图 1-4 项目方案简介	3
图 2-1 输入本装置的指令结构	5
图 2-2 五杆机构夹取器	6
图 2-3 机械臂运动流程图	7
图 2-4 本装置的总工作流程图	7
图 3-1 机械臂运动简图	9
图 3-2 云台减速机构设计（第一次）	10
图 3-3 淘宝蜗杆尺寸图	11
图 3-4 蜗杆尺寸和传动比的关系	11
图 3-5 蜗杆的结构设计	12
图 3-6 云台主轴结构设计	13
图 3-7 大臂和前臂相连的关节轴的结构设计	13
图 3-8 前臂与腕部连接处的轴的结构设计	13
图 3-9 云台主轴所受载荷和约束情况	14
图 3-10 云台主轴的正应力云图	15
图 3-11 云台主轴的切应力云图	15
图 3-12 云台主轴的拉伸位移云图	15
图 3-13 末端执行机构总览	16
图 3-14 下部传动模块	17
图 3-15 电机外接竖轴	17
图 3-16 竖伞齿轮轴	18
图 3-17 直齿轮	19
图 3-18 上机架横板	19
图 3-19 下机架横板	19
图 3-20 换向夹取模块	20
图 3-21 switching	20
图 3-22 五杆机构	21
图 3-23 水平伞齿轮轴	22
图 3-24 伞齿轮	22
图 3-25 五杆机构构件 1 和构件 2	23
图 3-26 五杆机构构件 3 和构件 4	23
图 3-27 机架竖板	24
图 3-28 扭簧	24

图 4-1 基座装配图	28
图 4-2 机械臂装配图	29
图 4-3 机械手装配图	30
图 5-1 86 步进电机	32
图 5-2 42 步进减速电机	32
图 5-3 直流有刷电机	32
图 5-4 DM542	33
图 5-5 DM542C	33
图 5-6 L298N	33
图 5-7 250W 电源	33
图 5-8 100W 电源	34
图 5-9 12V 电源	34
图 5-10 压力传感器	35
图 5-11 arduino UNO	35

表格索引

表-1 expenditure statistics 42

第一章 引言

本项目设计“面向肯德基的餐食分装传送装置”。

本章节聚焦立项背景和设计任务书两部分。

1.1 立项背景

本项目的立项是基于对肯德基目前状况的调查后展开。

本项目选择人流量多的东川路地铁站肯德基门店作为调研对象。经过采访店员后，得到目前门店收银与取餐存在的问题有：高峰期人流多忙不过来；人手不少但效率不高；收银与取餐重叠，存在顾此失彼状况。另外，随机抽选五家上海不同处的肯德基，分析其店面布局，总结出以下特点：收银区域与取餐区域分离；食物集中摆放于食物架上，集中而固定；取餐区域后侧即为食物架，中间有一定可操作区域。

可以发现，肯德基目前需要一个能够减轻店员负担，解决店员一人负责多项任务的状况，且适合肯德基店面布局的产品。本项目旨在设计、制造出一个面向肯德基的餐食分装传送装置，尝试为目前存在的问题提供一种解决新思路。

1.2 竞品分析

1.2.1 (CN207943221) 一种快餐自动打包机

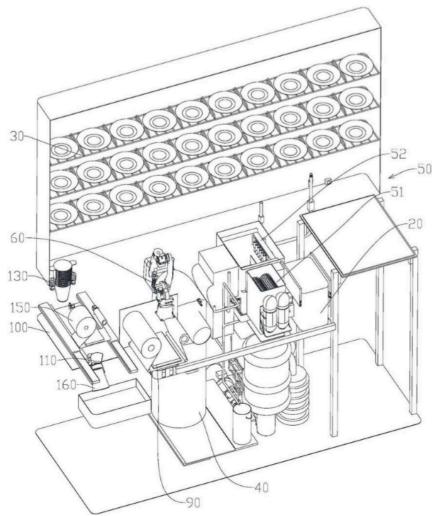


图 1-1 竞品 1

Figure 1-1 competitor 1

该产品具备餐具供给装置、送饭装置、撕碎装置、切片装置、餐具封膜装置、饮品打包装置，占地面积大，机构复杂，适用于中餐，不适用于肯德基类的西式快餐店。

1.2.2 (CN105836207) 模块化快餐自动打包机

该产品通过移动餐盘经过菜品下料口依次下料，针对不同类型的菜品（片状、带状、块状等）采取模块化的下料方式，对于肯德基体积较大的汉堡类食物友好性差，且无法传送饮料。

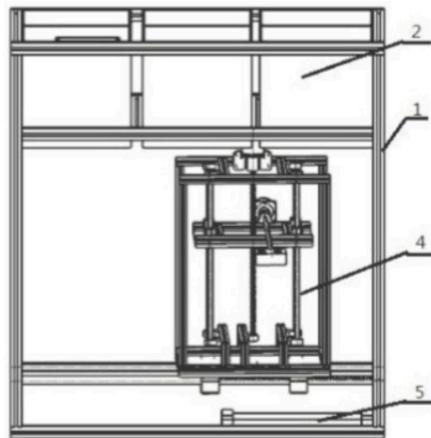


图 1-2 竞品 2
Figure 1-2 competitor 2

1.2.3 (CN109903461) 自动快餐贩卖机

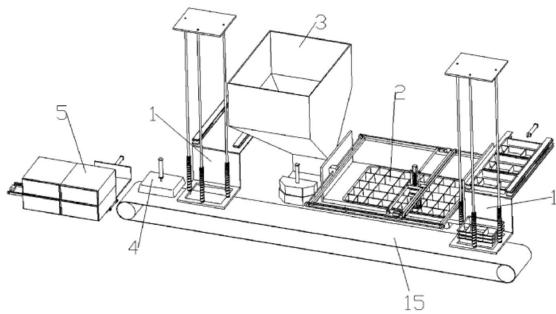


图 1-3 竞品 3
Figure 1-3 competitor 3

该产品利用丝杆滑台操控机械臂的位置，抓取统一尺寸的小餐盘，机械臂不需要自适应，对于肯德基这类没有统一餐盘的餐厅不友好。

1.3 项目任务书

1.3.1 题目：面向肯德基的餐食分装传送装置

1.3.2 项目方案简介

本项目设计一个四自由度机械臂加一自适应机械手来夹取汉堡、饮料、小食，其包含有：一个云台、一个大臂（1号臂）、一个前臂（2号臂）、一个腕部（3号臂）、一个自适应末端执行机构（手部）。机械臂功能要实现根据收到的指令，机械臂转动、自适应夹取食物，放置食物。

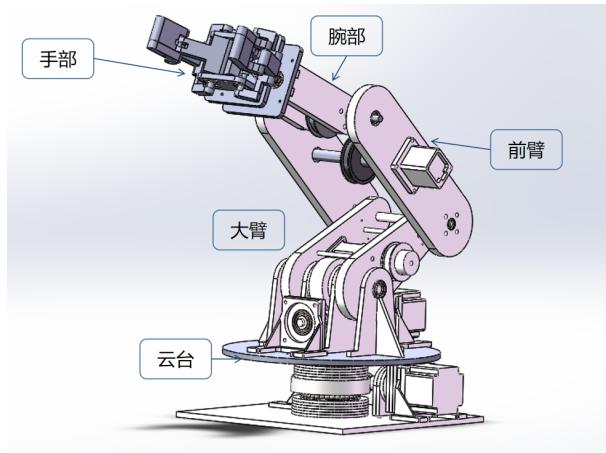


图 1-4 总体项目方案图

Figure 1-4 overall project figure

1.3.3 项目预期目标

制作出 1:1 的机械臂实物模型，并能够实现：

- (1) 云台 360° 转动
- (2) 1 号臂俯仰范围 90°
- (3) 2 号臂俯仰范围 50°
- (4) 腕部俯仰范围 90°
- (5) 手部张合范围 120°
- (6) 根据输入指令自动转动机械臂夹取食物，并放置于指定区域。

1.3.4 任务

- (1) 云台、1 号臂、2 号臂、腕部、手部分别的详细设计图纸
- (2) 重要零件应力分析
- (3) 各加工部分的零件图
- (4) 机械臂的总体装配图
- (5) 机械臂运动学仿真
- (6) 电机、驱动器型号选择
- (7) 机械臂实物制作
- (8) 设计说明书撰写

1.3.5 成果呈现方式

本项目成果最主要呈现方式为 1:1 实物模型展示，并能现场演示各项功能。其他成果包括本设计说明书。

1.3.6 项目起止时间：2019.9.27 至 2020.1.11

第二章 功能分解和总体设计思路

2.1 功能分解

本项目所设计的装置的目标功能可以分解为接收和分析指令、夹取不同的工件和将其移动到指定位置。

2.1.1 接收和分析指令

本装置接受到的指令需要包含夹取的工件位置列表，所需夹取的工件的类别列表等信息。位置坐标使用笛卡尔坐标系，以本装置的基坐标为基底描述；工件的类别用不同的字符串描述。在本装置完成夹取装盘后，是否通知顾客取单还取决于以实时取餐区域剩余工件数量等，所以本装置接收到得指令中应能够指示其完成夹取后的行为。

综上所述，输入本装置的指令应可用如图2-1所示的数据结构储存。

```
msg = [
    ['all', [0, 0, 0]],
    # 'all' 表示仅由该装置就可以夹取本次订单上的所有所需工件
    # 第一个元素的坐标不具有实际意义，[0, 0, 0] 也是根本不可能达到的坐标
    ['cola', [1, 2, 2]],
    ['hamburger', [1, 3, 3]]
]
```

图 2-1 输入本装置的指令结构

Figure 2-1 Input command structure

为保证系统的稳定运行，我们拟不对用户开放设置装置运动快慢的接口。

2.1.2 夹取不同的工件

为了使我们的末端执行机构能够夹取不同形态的工件，我们在设计末端执行机构时使用了两自由度的夹取器。举个例子，在如图2-2所示的末端执行机构中，原动件有就有两个：跟电机输出轴相连接的轴（图2-2中的 E, E' ）和工件的形态尺寸的对夹取作用的杆（图2-2中的 $3, 3'$ ）。

2.1.3 移动工件

在移动工件有很多解决方案，为了方便直接改装现有的肯德基餐厅并且保留更多的可开发性，本项目在设计时放弃了诸如传送带等运输方式，而是采用一个具有多自由度的机械臂来移动工件。考虑到在移动特殊工件（如饮料）时，机械臂的末端需要保持水平以防止液体溢出，所以我们所设计的机械臂应有一个冗余的自由度，而移动工件的空间坐标 (x, y, z) 至少需要 3 个自由度，所以我们所设计的机械臂至少需要 4 个自由度。

根据上述功能分解，为了满足我们对肯德基快餐的分装传送需求，我们给出的解决方案为：一个四自由度的机械臂加一个自适应末端执行机构。

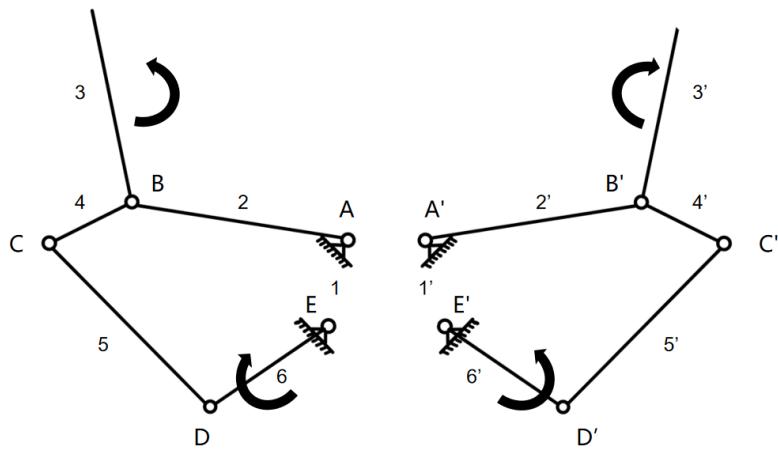


图 2-2 用五杆机构实现的末端执行机构
Figure 2-2 End effector with five-bar mechanism

2.2 运动转换的基本功能和传动、减速机构的选型

2.2.1 运动类型的转化

在本装置中，四自由度机械手的是一个位置随动的开环控制系统，各个关节的转动由步进电机就可以驱动，通过发送脉冲可控制其转动到指定角度。因此在这一部分，原动件运动类型为转动（周转、摆动），从动件的运动类型为摆动，所以运动类型不需要转化；而在本装置的末端执行机构中，需要将原动件的转动转化为夹取运动，采用图2-2所示的五杆机构就可以实现这种转化。

2.2.2 机构选型总思路

设计时需要我们进行选型的机构主要是传动、减速机构，选择的依据如下：

1. 根据从动件的运动轨迹（不与实际设计的机架相干涉）选择末端执行机构；
2. 根据市面上方便买到的电机的功率、额定扭矩和我们所大致需要的扭矩选择我们的减速机构；
3. 在满足基本要求的前提下，选取较轻、市场上容易买到而且价格便宜的材料。

2.3 工作流程

根据上述分析可以绘制本装置的工作流程图如图2-4。其中，机械臂运动的可以用工作流程图可以表示如图2-3。在提取下一时刻各个关节位置时，若已经到达运动轨迹终点，则下一时刻各关节位置与当前相同。

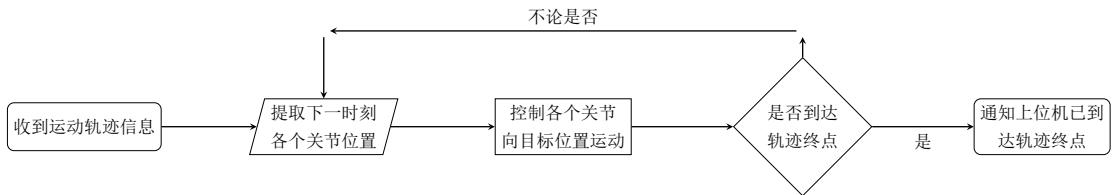


图 2-3 机械臂运动流程图
Figure 2-3 Robotic arm moving flow chart

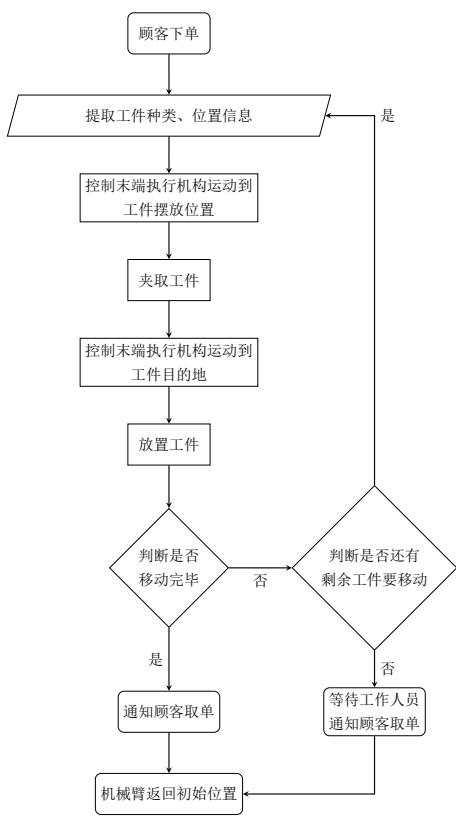


图 2-4 总工作流程图
Figure 2-4 Overall workflow

第三章 机械结构详细设计

3.1 机械臂

3.1.1 粗略计算

首先我们需要确定好三个臂的长度和扭矩的大致要求。

对于四轴机器人，云台轴落在地上，扭矩要求主要受到转动惯量的影响，不需要克服自重，因此我们考虑机械臂其他位置所需要的扭矩的时候选取了过机械臂的一竖直平面对其进行分析，得到如图3-1所示的运动简图。由此可以计算其末端距离原点的水平距离 r ，竖直距离 y ，以及末端俯仰角 θ 和输入各个结点角度 $\theta_1, \theta_{21}, \theta_{32}$ 的之间的关系由公式 3-1 确定。

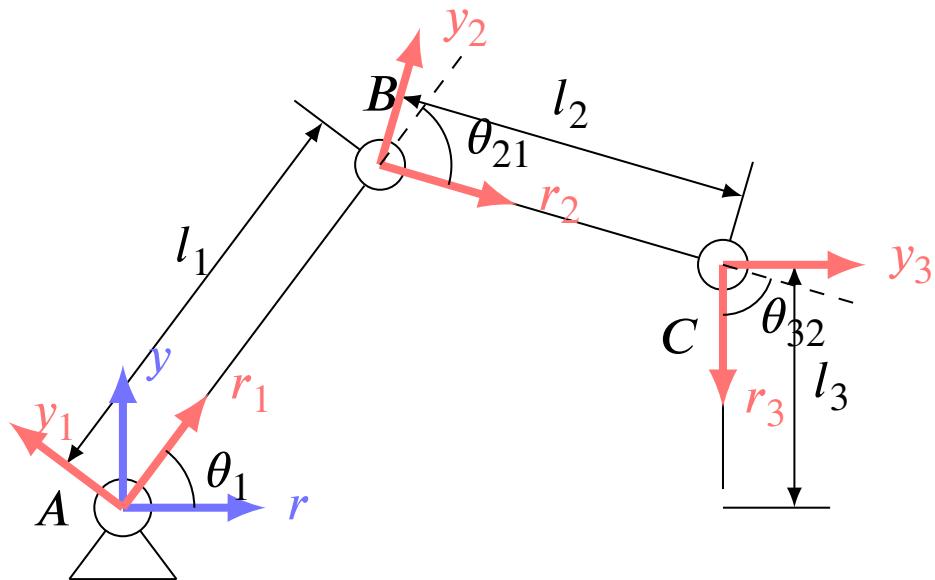


图 3-1 机械臂运动简图
Figure 3-1 Robot arm motion diagram

$$\begin{bmatrix} r_o \\ y_o \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_{21}) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_{21} + \theta_{32}) \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_{21}) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_{21} + \theta_{32}) \\ \theta_1 + \theta_{21} + \theta_{32} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

假定杆件材料使用铝型材柱状杆件，其重量可由公式 3-2 确定，再加上末端的负载重量和每个结点上的电机重量。根据静力学平衡条件 3-3，在预先假设了杆件长度的前提下，可以计算出机构在任意姿态下的各个结点的扭矩。我们选取夹取汉堡时的运动规律（末端俯仰角为 $-\frac{\pi}{2}$ ）和夹取饮料时的运动规律（末端俯仰角为 0），分别计算机构每一时刻每一结点所受到的扭矩，最后输出最大扭矩。

$$G = \rho A l g \quad (3-2)$$

$$\Sigma M = \Sigma Fl \quad (3-3)$$

选用不同的杆件长度进行计算，可以初步选择杆件长度。当然，老师的建议我们也有听取，选择了那智不二越 MZ07 六轴机器人的尺寸比例进行参考，最终选择了 $l_1 = 220, l_2 = 300, l_3 = 280$ （单位：毫米）的组合进行设计。按照这个组合，根据上述计算方法，我们得到 A, B, C 三个结点克服重力所需要提供的扭矩分别为 $50N \cdot M, 35N \cdot M, 25N \cdot M$

但考虑只用一根铝型材杆件做机械臂不但不利于安装，还可能有较大的挠度，我们最终选取的是方便切割、铣加工的板材作为机械臂的三个臂。这样算下来，实际需要每个结点提供的扭矩可能会超过上述计算，故在设计时，我们以上述计算的两倍来设计减速器。

3.1.2 机构选型

机械臂部分的机构主要是传动机构，其选择的基本原则是满足强度要求的前提下选取最小质量的传动作件。本小节将一一介绍本机械臂传动机构选择的过程。

3.1.2.1 减速机构选型

正如小节3.1.1所述，云台处需要在加速时（启动或停下）提供超大的扭矩。其中，为了减小停止运动时，由整个机械臂带来的巨大的惯性力对电机的危害，我们在设计传动机构时选择了单向自锁的蜗轮蜗杆传动。

在第一次设计时，选取了如图 3-2 所示的蜗轮蜗杆外加行星轮减速的两级减速机构设计。该机构减速比约为 100 左右，其中蜗轮蜗杆减速比达到了 15。

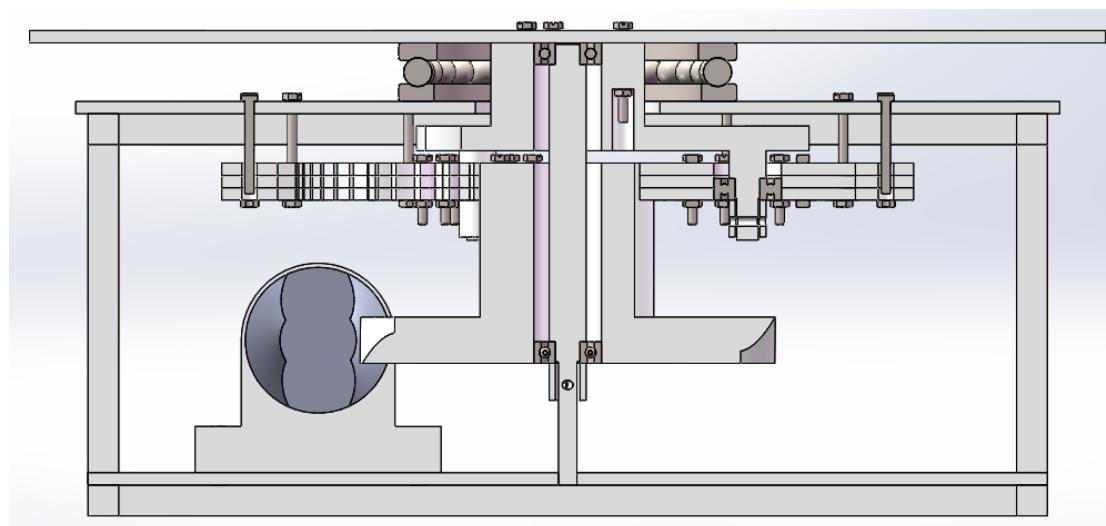


图 3-2 云台减速机构设计（第一次）

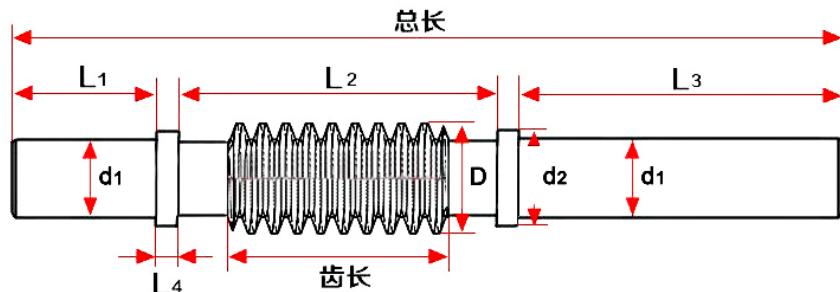
Figure 3-2 Transmission design of rotational platform (original design)

但考虑到过大的减速比会使平台的转速过慢，而且多级传动时，为保证精度，一般将传动比高的减速机构布置在低速级^[1]。因此再后来的改进设计中，我们更换了方案，只采用一对蜗轮蜗杆副传动。

首先在淘宝上找到一家销售蜗轮蜗杆副的店家，得到他们的尺寸如图 3-3 所示。

查阅相关资料得到蜗轮蜗杆副的设计如式 3-4。

$$m^2 d_1 \geq \left(\frac{15000}{\sigma_{HP} z_2} \right)^2 K T_2 \quad (3-4)$$



注：以下尺码仅供参考具体以实物尺码为准（单位 长度毫米/mm 重量公斤/kg）

模数	总长	齿长	L1	L2	L3	L4	D	d1	d2	重量
1M	150	20	40	32	70	4	20	16	17.5	0.24
1.5M	230	25	63	40	116	5.5	24	18	20	0.48
2M	240	32	64	49	116	5.5	30	20	24	0.67
2.5M	260	43	65	56	128	5.5	35	25	28	1.03
3M	280	50	70	64	135	5.5	42	30	35	1.68
4M	320	65	78	78	152	5	52	32	40	2.41

图 3-3 蜗杆尺寸图

Figure 3-3 Worm size chart

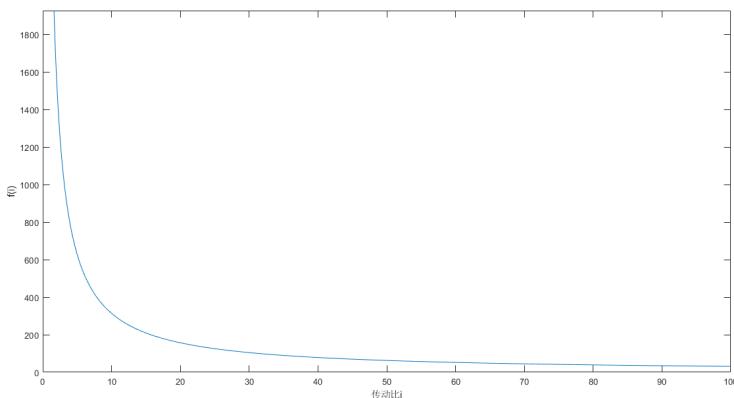


图 3-4 f(i) 的函数图像

Figure 3-4 Function image of f (i)

取蜗轮蜗杆传动中的机械效率 $\eta = 0.7$ 可得到依据输入扭矩 T_1 的设计式 3-5。

$$m^2 d_1 \geq \left(\frac{15000}{\sigma_{HP} z_2} \right)^2 K (0.7 i T_1), i = \frac{z_2}{z_1} \quad (3-5)$$

淘宝上所购的的蜗杆都是单头蜗杆，故有 $m^2 d_1 \geq f(i)$ ；所购的的蜗杆和蜗轮都是 45 号钢的材质，查表得到其许用接触应力 $\sigma_{HP} = 475 Mpa$ 。故作 $f(i)$ 图像如图 3-4 所示。

由于这里已经选取了最大额定负载为 $4.5 N \cdot M$ 的电机，所以为了使输出扭矩满足要求，该处传动比选择为 $i = 55$ ，带入计算得到 $m^2 d_1 \geq f(i) = 60.17 mm^3$ 。故选取淘宝上模数为 2 的蜗杆，再带入验算式 3-6。计算得到 $\sigma_H = 492 MPa \geq [\sigma_{HP}]$ 。故不合乎要求，应选取更大

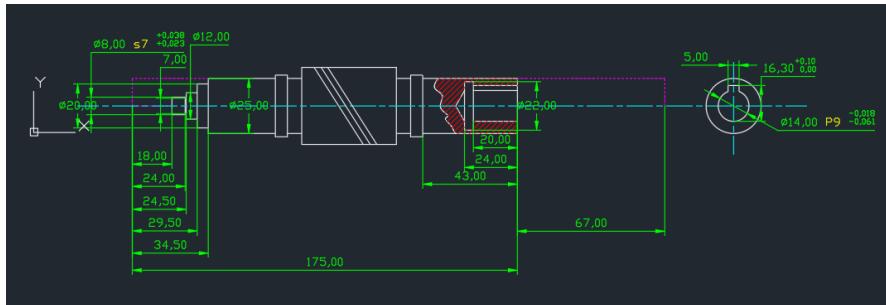


图 3-5 蜗杆的结构设计（以 2.5M 的为例）

Figure 3-5 Structural design drawing of worm (take 2.5M as an example)

的蜗杆。重新选取淘宝上模数为 2.5 的蜗杆，带入验算式 3-6 得到 $\sigma_H = 367 MPa \leq [\sigma_{HP}]$ ，合乎强度要求。

$$\sigma_H = Z_E \sqrt{\frac{9400T_2}{d_1 d_2^2} K_A K_V K_\beta} \leq \sigma_{HP} \quad (3-6)$$

同样的道理，由于大臂的传动需要输出的扭矩约为 $100 N \cdot M$ ，参照上述选取规则，选用 3 模 30 齿的蜗轮蜗杆副进行传动。

而因为在臂上不是很方便自己布置开式减速机构，故另外两个关节依靠淘宝上十分容易购买的直接和电机相连的减速箱来进行减速。这样虽然转速很慢，但扭矩能够保证，我们也是进行了一番取舍才选择了这种方案。

3.1.2.2 传动机构选型

对于布置在机械臂上的电机，其越接近根结点（图 3-1 中 A 结点），越有利于减轻各个关节处的负载，故在实际布置时，我们往往使电机距离铰接处较远，这时需要机构把电机输出的运动往结点传递。本小节讨论的机构即是进行这类运动传输的机构。

由于中心距较大，我们首先排除了使用齿轮的方案。考虑到传送的扭矩比较大，不能使用普通带传动。而链传动的重量也不小，而且传动不平稳，在这种场合布置还可能有较大垂度，故我们最后选取了实惠又高效的同步带传动。并选取最大的尺寸以尽量减少同步带工作时的紧边拉力。

3.1.3 轴的设计和验算

3.1.3.1 轴的结构设计

1. 蜗杆的结构设计为一端装轴承，一端直接和电机的轴用键连接，如图 3-5 所示。
2. 云台上的主轴由于所受弯矩最大，所以给加了四个轴承支座作支撑。其结构设计如图 3-6 所示。
3. 大臂和前臂相连的关节处有布置在悬伸端的同步带轮，为了改善轴的受力情况，使用如图 3-7 所示的卸载结构，使转轴变成心轴，只承受弯矩提高了旋转精度。
4. 前臂和腕部相连接的关节处也采用了类似的思想来减小载荷。如图 3-8 所示。
5. 驱动腕部的电机轴同蜗杆，也采用了带键槽的盲孔设计。

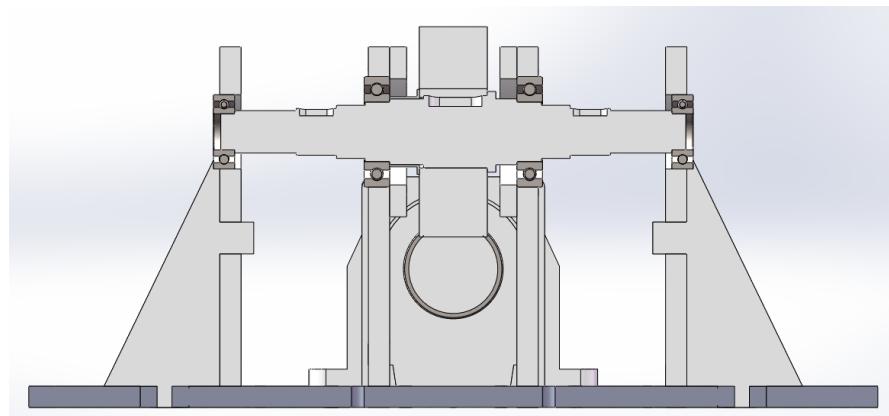


图 3-6 云台主轴结构设计
Figure 3-6 Structural design of gimbal spindle



图 3-7 大臂和前臂相连的关节轴的结构设计
Figure 3-7 Structural design of the joint shaft connecting the arm 1 and arm 2

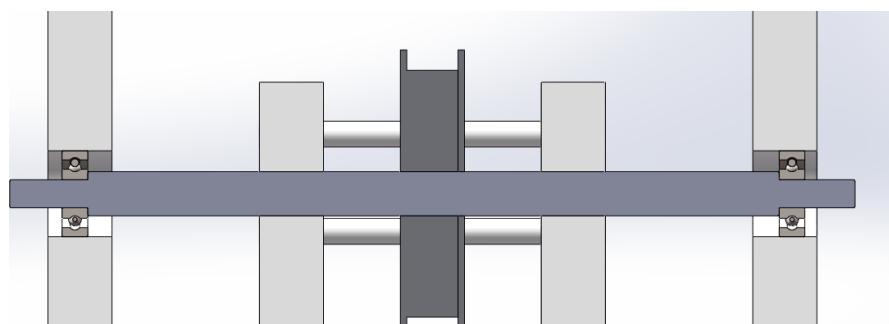


图 3-8 前臂与腕部连接处的轴的结构设计
Figure 3-8 Structural design of the shaft at the junction of the arm 2 and the arm 3

3.1.3.2 轴的强度、刚度计算

在进行强度计算时，对应不同类型的轴有不同的计算方法来估计其最小截面。

1. 对于转轴，同时承受弯矩和转矩，应满足第四强度理论计算公式 3-7。

$$\sigma_{ca} = \sqrt{\left(\frac{M}{W}\right)^2 + 4\left(\frac{\alpha T}{W_T}\right)^2} \approx \frac{\sqrt{M^2 + (\alpha T)^2}}{W} \leq [\sigma_{-1}] \quad (3-7)$$

2. 对于心轴，只承受弯矩，应满足式 3-8

$$\sigma_{ca} = \frac{M}{W} \leq [\sigma_{-1}] \quad (3-8)$$

而具体到本装置中所使用的轴，云台主轴所受约束较多，直接用材料力学的方法去计算有些困难，采用有限元分析的方法¹辅助设计。其余轴都很简单，本小节不再一一细说。

在进行刚度计算时，先进行扭转刚度计算，对于本装置中使用的阶梯轴，需要校核其扭转角，计算公式参见式 3-9

$$\phi = 5.73 \times 10^4 \frac{1}{LG} \sum_{i=1}^z \frac{T_i l_i}{I_{Pi}} \quad (3-9)$$

在进行弯曲刚度计算时，对于本装置中用到的阶梯轴，均可以用当量直径法^[1]作近似计算，校核挠度、偏转角。

3.1.4 云台主轴的有限元分析

在对云台主轴进行有限元分析之前，需要进行前处理：输入蜗杆的几何模型、对几何模型划分网格。并根据轴的实际受力情况施加载荷（图 3-9，A 处受到蜗轮输出的扭矩和蜗轮的重力；B 处受到大臂向下压轴的径向力，姑且假定两边对称；D 和 E 分别是四个径向约束和两个扭转约束。）求解后进行输出应力应变云图。

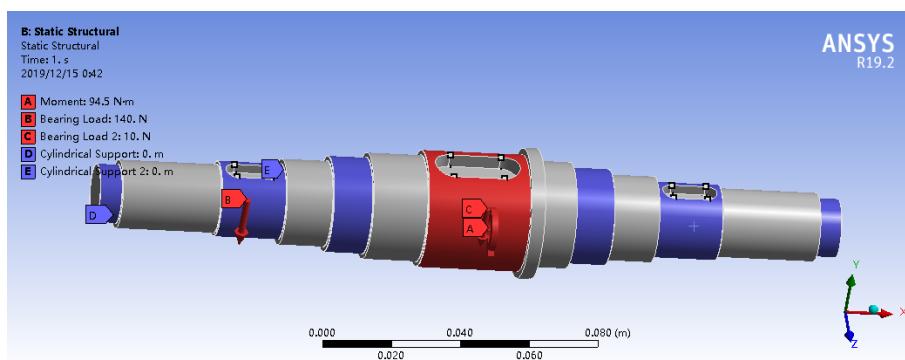


图 3-9 云台主轴所受载荷和约束情况

Figure 3-9 Loads and constraints on the gimbal spindle

从图 3-10、图 3-11 和图 3-12 中可以清楚地看到：按云台主轴原本所设计的尺寸计算，正应力，拉伸位移都在许用值以内，只是有一小部分的剪切应力超出了许用值，但考虑到实际工作中满载的几率微乎其微，对轴的实际使用寿命影响很小，也考虑到经费的原因，故决定不再加粗，就以此尺寸加工。

¹ 参见下一小节

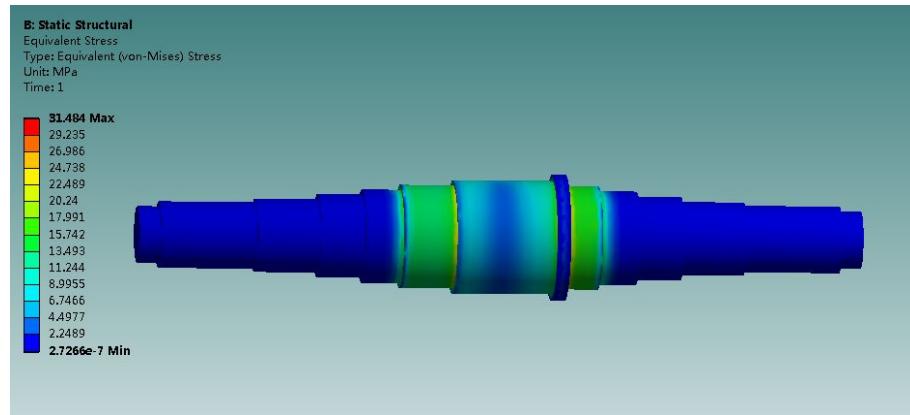


图 3-10 正应力

Figure 3-10 Normal stress

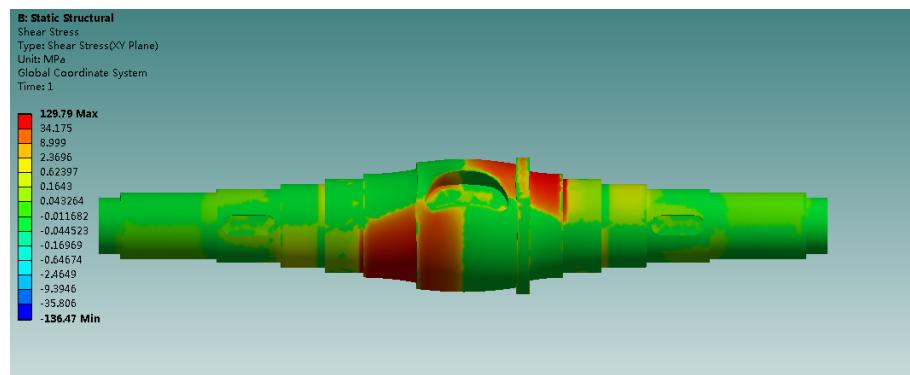


图 3-11 切应力

Figure 3-11 Shear stress

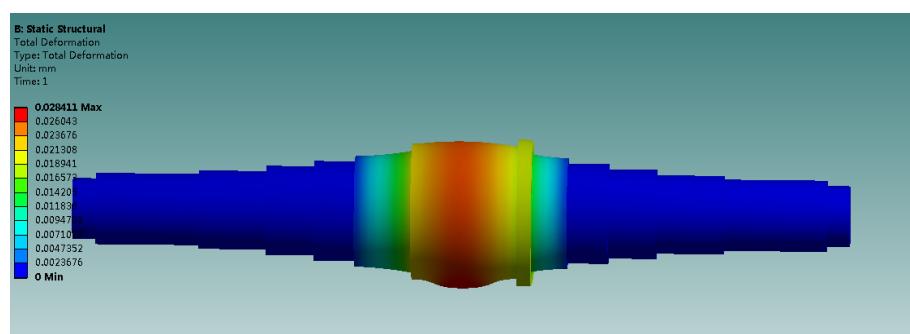


图 3-12 拉伸位移

Figure 3-12 Tensile displacement

3.2 自适应末端执行机构

为了能够使用同一个抓手抓取不同的 KFC 产品，例如不同大小的汉堡、可乐、薯条等，需要夹取机构能够适应不同的大小和形状，并且在夹取物品的同时保持其较小的形变。因而末端执行机构采用了如下图所示的自适应设计。

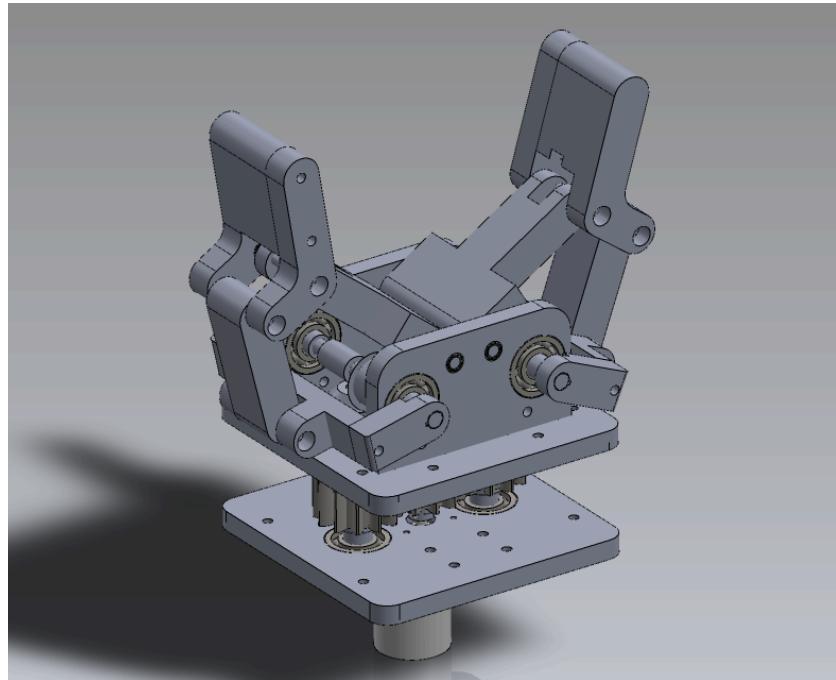


图 3-13 末端执行机构总览
Figure 3-13 Overview of end actuators

末端执行机构可以分为两个模块分别是：下层传动模块和换向夹取模块。下层传动模块负责将电机的转动转化为伞齿轮的转动，换向夹取模块则将伞齿轮轴的转动转化为抓手的相对转动从而实现夹取动作。

3.2.1 下层传动模块

传动模块总览如图3-14，主要由电机、三个直齿轮、伞齿轮、轴承和上下两个机架横板组成。

电机通过螺钉和下机架横板固定，电机 D 型轴和电机外接竖轴通过紧定螺钉实现周向固定。外接竖轴带动中间伞齿轮转动，进而通过直齿轮传动带动竖伞齿轮轴的转动。竖伞齿轮轴上部也通过紧定螺钉和伞齿轮连接，最终使伞齿轮同向转动。

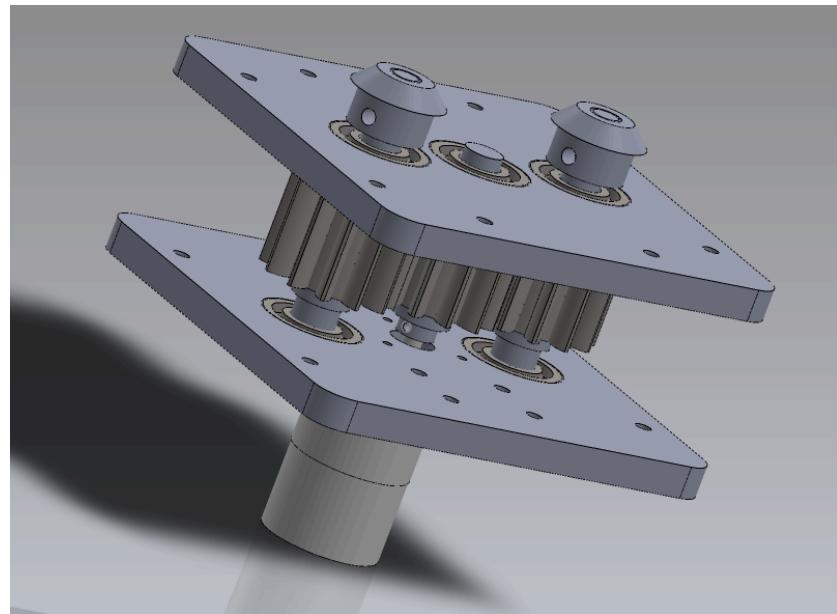


图 3-14 下部传动模块
Figure 3-14 module for transmission



图 3-15 电机外接竖轴
Figure 3-15 External axis of the motor

3.2.1.1 电机外接竖轴

电机外接竖轴如图3-15，轴底部开有5mm的孔和电机轴连接，侧面开有3mm的孔用以安装紧定螺钉，轴头开键槽用以带动直齿轮转动。轴颈部分和轴承内圈过盈配合，轴承和齿轮之间有5mm的套筒以进行轴向定位。

3.2.1.2 竖伞齿轮轴

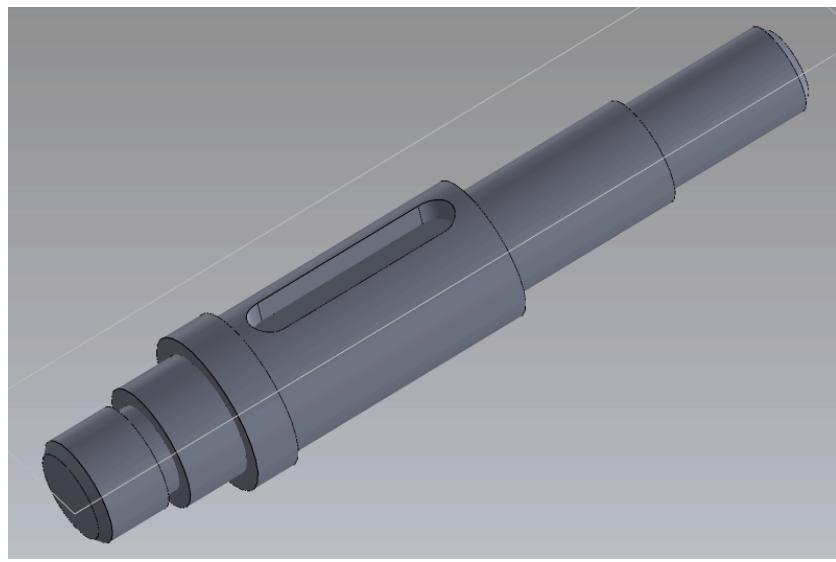


图 3-16 竖伞齿轮轴
Figure 3-16 Vertical axis for bevel gear

竖伞齿轮轴中部轴头开键槽由直齿轮带动转动。上下轴颈分别和6201深沟球轴承过盈配合，其中下轴颈上有砂轮越程槽以方便表面磨削，直齿轮和上侧轴承由套筒轴向定位。上轴头上装有伞齿轮，通过紧定螺钉周向定位。竖伞齿轮轴有两个，对称分布在电机外接竖轴两侧。

3.2.1.3 直齿轮

直齿轮的模数为3，内径为16mm，分度圆为36mm，齿宽为30mm，直齿轮中开键槽（查阅机械设计手册，采用标准键槽5*5，轮毂上的深度为）。直齿轮如图3-17。

3.2.1.4 机架横板

上下两个机架横板用来固定轴承，两个横板通过双头螺柱固定。其中上机架横板另打有四个孔用以安装角铁来固定机架竖版，如图3-18。（机架竖版将在下一个模块介绍）

下机架横板中间的大圆孔直径比电机轴稍大，大孔周围的四个小孔用来固定电机，具体结构如图3-19。此外，电机轴孔两侧共还有8个5mm孔用来通过螺栓和腕部进行固定。

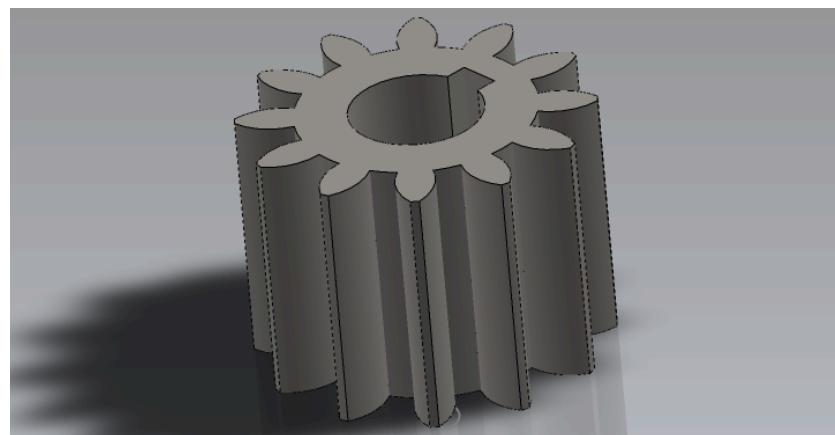


图 3-17 直齿轮
Figure 3-17 Spur gear

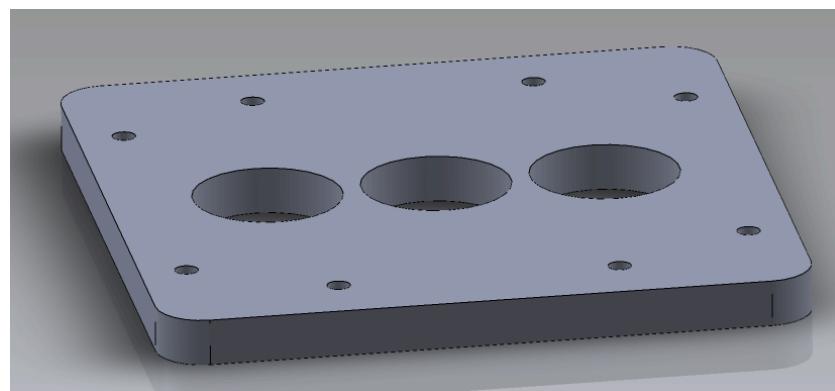


图 3-18 上机架横板
Figure 3-18 Frame (upper horizontal board)

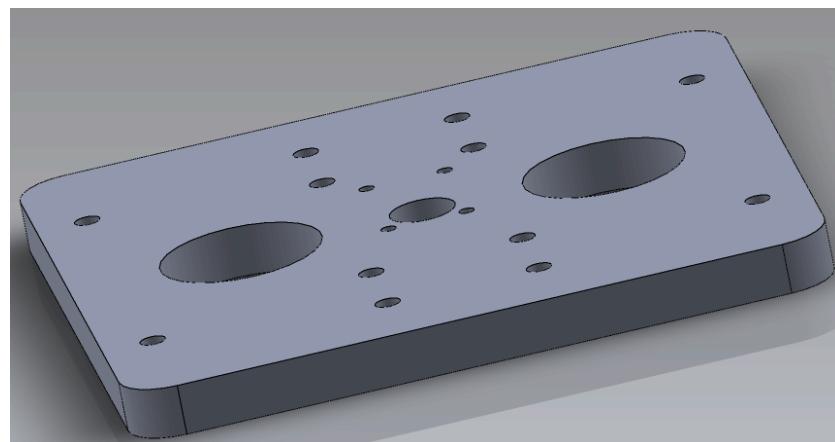


图 3-19 下机架横板
Figure 3-19 Frame (lower horizontal board)

3.2.2 换向夹取模块

该模块主要为了实现两部分功能：一是将竖直放置的伞齿轮的同向转动，转换为横向放置的伞齿轮的相对转动，以使夹取物品时两抓手同时向中间靠拢；二是通过对称的两个五杆机构和扭簧相结合实现自适应抓取。如图3-20。

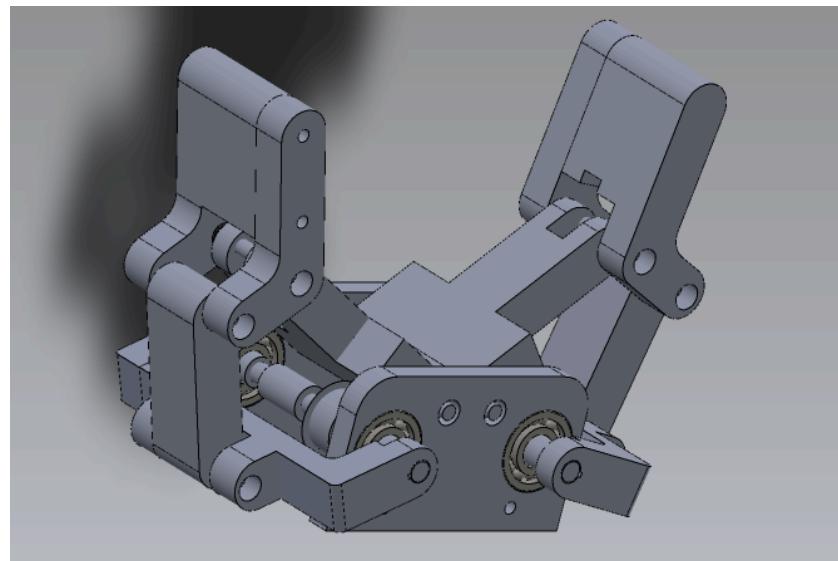


图 3-20 换向夹取模块

Figure 3-20 Module for switching and clamping

本模块通过将水平放置的伞齿轮分别在啮合在竖直伞齿轮的对侧，实现换向功能。为了能够使机构两侧对称，并且两侧轴承类型相同以便于加工和装配，采用两个长短不同的轴通过联轴器连接共同构成水平伞齿轮轴。实际情况如图3-21

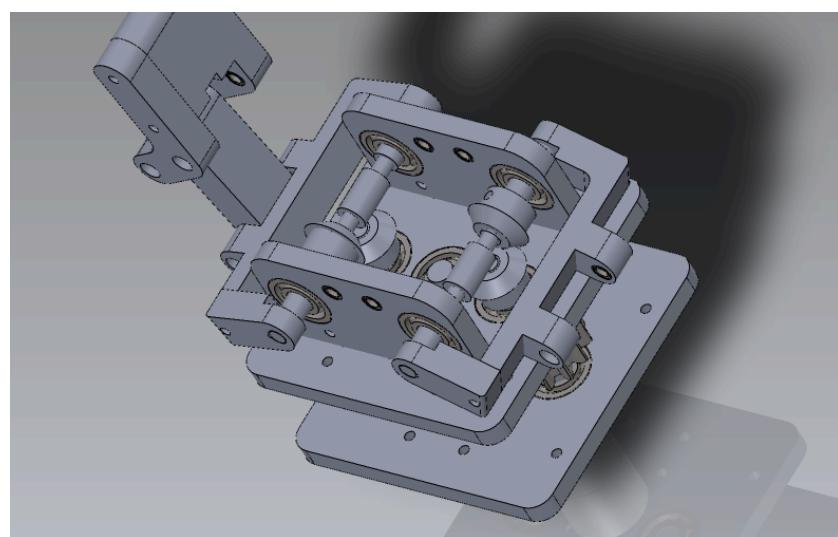


图 3-21 换向原理图

Figure 3-21 switching

夹取物品通过五杆机构实现，五杆机构实际具有两个自由度，但本装置利用扭簧和被抓物体的反作用力使抓手在夹取物品的不同阶段只具有一个自由度。扭簧套在构件 3 和构件 4 的铰链轴上，扭簧的两脚分别和构件 3 与构件 4 固结。如图3-22，在构件 4 接触到被夹取物之前，由于扭簧的扭力的作用，构件 3 和构件 4 的相对运动会受到阻碍，此时这两个构件近似于一个整体，相当于一个类四杆机构，构件 3 和构件 4 同时向内旋转；当构件 4 接触到被夹取物时受到反作用力难以继续转动，此时杆 1 在水平伞齿轮轴的驱动下作为原动件，推动构件 3 克服扭簧的扭力继续向内旋转。合理调整扭簧的参数就可以实现自适应的目的构件 3 上装有薄膜传感器，因而可以实现对不同形状和软硬度的物品的包络和夹取，并且不会造成损坏。

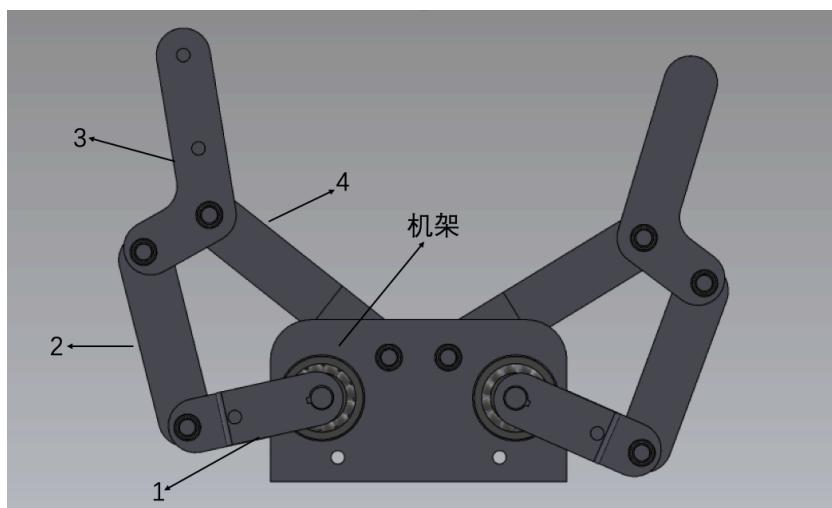


图 3-22 五杆机构
Figure 3-22 five-pole mechanism

3.2.2.1 水平伞齿轮轴

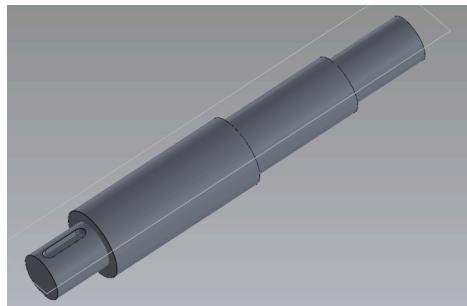
考虑到轴承的购买和装配，以及两侧的机架竖版的加工问题，水平伞齿轮轴拟采用两部分组成，水平伞齿轮轴 1 和水平伞齿轮轴 2 由联轴器连接，两侧轴颈部分均和 6201 轴承过盈配合，两个部件如图3-26。

水平伞齿轮轴 1 左下方轴头上开键槽（公称直径为 2mm*2mm），用以带动五杆机构中的杆 1 转动，右上第二个阶梯上装有伞齿轮并与下层传动模块上的伞齿轮啮合，无键槽的另一侧连联轴器。

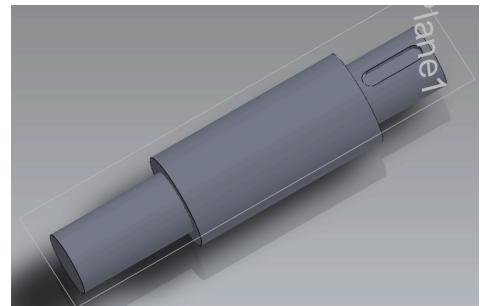
水平伞齿轮轴 2 右上方轴头开键槽（公称直径也为 2mm*2mm），中部轴颈和轴承配合，左下方与联轴器相连。

3.2.2.2 伞齿轮

伞齿轮采用 1.5 模 20 齿，内孔为 10mm，伞齿轮采用 5mm 的紧定螺钉固定在水平伞齿轮轴 1 上。



a) 水平伞齿轮横轴 1
a) Horizontal axis one for the bevel gear



b) 水平伞齿轮横轴 2
b) Horizontal axis two for the bevel gear

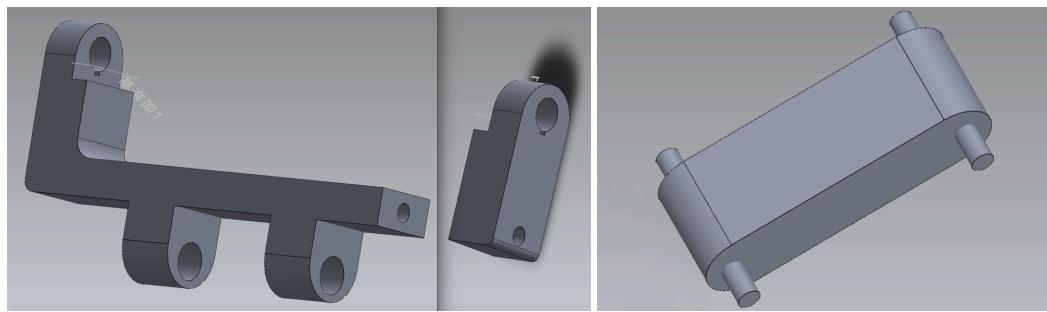
图 3-23 水平伞齿轮轴
Figure 3-23 Example with subcaptionbox



图 3-24 伞齿轮
Figure 3-24 Bevel gear

3.2.2.3 五杆机构构件 1 和构件 2

构件一由两部分组成，由长螺钉固定。装配时距离较远的两个孔中有键槽，因此可以通过键链接被水平伞齿轮轴带动；距离较近的孔通过轴承和构件 2 连接。构件 1 构件 2 如图3-26。



a) 五杆机构构件 1
a) Component one

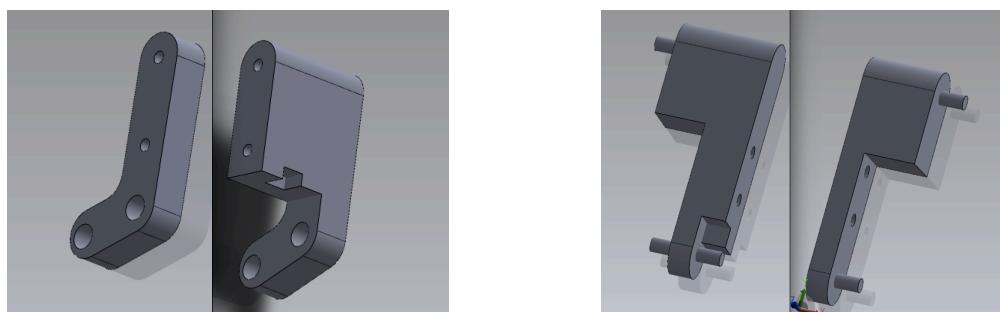
b) 五杆机构构件 2
b) Component two

图 3-25 五杆机构构件 1 和构件 2
Figure 3-25 five-pole mechanism

3.2.2.4 五杆机构构件 3 和构件 4

构件 3 也由两部分组成，通过连个螺钉连接固定。两对通孔内均装轴承，分别可夹住构件 2 和构件 4。构件 3 的主要部分上设有凹槽用来固定扭簧的一脚。

构件 4 设计成两部分来安装扭簧，较大的一部分上有内伸轴作为扭簧的固定轴，并且也有凹槽来固定扭簧的另一脚。构件 4 的两对外伸轴分别通过轴承和构件 3 以及机架竖板相连。



a) 五杆机构构件 3
a) Component three

b) 五杆机构构件 4
b) Component four

图 3-26 五杆机构构件 3 和构件 4
Figure 3-26 five-pole mechanism

3.2.2.5 机架竖板

换向夹取机构含有两个相同的机架竖板，板厚 10mm，最大的一对孔用来放置 6201 滚动轴承，上方小孔用来放置较小的 608 轴承，下方的一对小孔用来固定角铁。

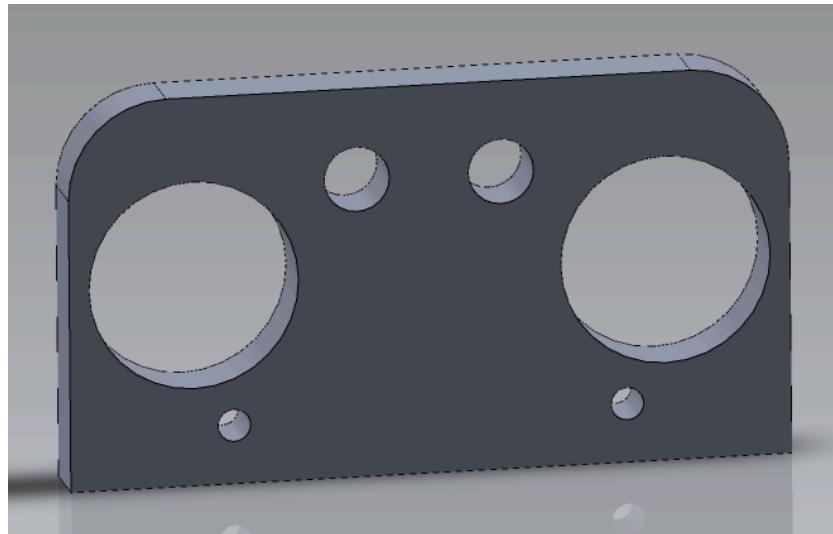


图 3-27 机架竖板
Figure 3-27 Frame (vertical board)

3.2.2.6 扭簧

扭簧为非标准定制，扭簧线径为 0.8mm，内径为 6.4mm 比内伸轴的直径略大以便于安装，圈数为两整圈，材质为不锈钢，扭簧右旋。



图 3-28 扭簧
Figure 3-28 Torsion spring

3.2.3 强度校核

3.2.3.1 伞齿轮校核

根据直齿锥齿轮的传动条件，需要进行接触疲劳强度校核以及齿根弯曲疲劳强度校核。

1. 齿面接触疲劳强度

齿面接触疲劳强度按照下式校核：

$$\sigma_H = 2.5 Z_E \sqrt{\frac{4K T_1}{0.85 \Phi_R (1-0.5\Phi_R)^2 (d_1)^3 u}} \leq [\sigma_H]$$

其中 Z_E 为弹性系数，与材料有关，伞齿轮材料为 45 号钢，查阅资料的弹性模量 E 为 210GPa，泊松比 μ 为 0.31，根据公式

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}}$$

代入数据 $\mu_1 = \mu_2 = 0.31, E_1 = E_2 = 210000 MPa$, 则 $Z_E = 192.29 \sqrt{MPa}$ 。载荷较稳定, 故 K 取 1; 齿宽系数

$$\Phi_R = \frac{b}{R_e}$$

代入数据 $b = 6.8mm, R_e = 21.21mm$, 则 $\Phi_R = 0.32$; 齿轮分度圆直径 $d_1 = 32.12mm$; 传动比 $u = 1$ 。夹取物体时, 手部的直流电机轴输出的扭矩约为 $0.2N \cdot m$, 此时经过计算, 每个伞齿轮传递的扭矩 $T_1 = 0.1N \cdot m$ 。将以上数据带入接触疲劳强度计算公式中得

$$\sigma_H = 120.56 MPa \leq [\sigma_H] = \frac{\sigma_{Hlim}}{S_H} = \frac{1120}{1.5} = 746.7 MPa$$

则接触疲劳强度足够。

2. 齿根弯曲疲劳强度

齿根弯曲疲劳强度按照下式校核:

$$\sigma_F = \frac{4KT_1Y_{Fa}Y_{Sa}}{0.85\Phi_R(1-0.5\Phi_R)^2z_1^2m^3\sqrt{1+u^2}} \leq [\sigma_F]$$

上式中大端模数 $m = 1.5mm$, 由 $z_1 = 20$ 得当量齿数为

$$z_v = \frac{z}{\cos(\delta)} = \frac{20}{\cos(\frac{\pi}{4})} = 28.28,$$

查阅齿型修正系数图表可得 $Y_{Fa} = 2.65, Y_{Sa} = 1.62$, 其余数据和接触强度校核计算式中数据相同。代入可得

$$\sigma_F = 4.69 KPa \leq [\sigma_F] = \frac{\sigma_{FE}}{S_F} = \frac{680}{2} = 340 MPa$$

综上, 可以发现伞齿轮的接触强度和弯曲疲劳强度完全符合要求。事实上, 因为传递的扭矩非常小, 可以用塑料或 3D 打印的材料来代替, 因为设计初期并未进行严格强度计算, 并且现行市场上金属制的齿轮更好买到, 所以直接在淘宝上购买了伞齿轮。

3.2.3.2 直齿轮校核

1. 齿面接触疲劳强度

直齿轮齿面接触强度校核公式为

$$\sigma_H = 2.5Z_E \sqrt{\frac{2KT_1(u+1)}{bd_1^2u}} \leq [\sigma_H]$$

三个直齿轮中, 电机外接轴上的齿轮传递的扭矩最大为 $0.2N \cdot m$, 齿宽 $b = 30mm$, 分度圆 $d_1 = 36mm$, 其余数据和上节相同, 带入得

$$\sigma_H = 2.18 MPa \leq [\sigma_H] = 746.7 MPa$$

接触强度足够。

2. 轮齿弯曲强度

齿根弯曲疲劳强度的校核公式:

$$\sigma_F = \frac{2KT_1Y_{Fa}Y_{Sa}}{bm^2z_1} \leq [\sigma_F]$$

上式中 $z_1 = 12, m = 3mm, b = 30mm$, 查阅齿型修正系数图表可得 $Y_{Fa} = 3.65, Y_{Sa} = 1.45$ $T_1 = 0.2N \cdot m$, 带入计算满足公式, 轮齿弯曲强度满足要求。

3.2.3.3 轴校核

对电机外接轴而言电机外接轴的重量约为 0.07kg，直齿轮的重量为 0.3kg，根据材料力学知识分析，当轴和水平面夹角约为 45 度时，轴中弯矩最大，约为 $0.05 N \cdot m$ 。电机外接轴上传递的扭矩为 $0.2 N \cdot m$ 。

根据弯扭合成强度计算公式

$$\sigma_e = \frac{M_e}{W} = \frac{\sqrt{M^2 + (\alpha * T)^2}}{0.1d^3} \leq [\sigma_{-1b}]$$

代入数据，由于该轴频繁正反转，受对称循环应力，故取折合系数 $\alpha = 1$

$$\sigma_e = 5 KPa \leq [\sigma_{-1b}] = 55 MPa$$

强度符合要求。

对于竖伞齿轮轴，分析过程与电机外伸轴相同，只是重量略大，但所受的扭矩为 $0.1 N \cdot m$ ，只是电机外接轴的一半，因此计算强度也符合要求。

第四章 零件的选择、加工与机构装配

4.1 零件材料的选择及加工

4.1.1 材料的选择

工欲善其事，必先利其器。在整个加工与装配过程中，我们分别根据基座、三臂与机械手的加工零件选择进行了详细的探讨。我们在首先确定了材料选择，其中机械手的部分由于设计个性化较强且结构复杂，因此我们采用了光敏树脂进行 3D 打印；对于基座和臂的部分，我们选择了亚克力板进行零件制作。对于传动和紧固件，如蜗轮蜗杆、轴等零件我们使用了生产加工中最常用的碳素结构钢——45 号钢进行加工。

4.1.2 零件的加工

在加工的过程中，我们实行了三步走战略——第一步，有标准件的直接购买标准件；第二步，能利用学校学生创新中心资源进行自主加工的，尽量自己加工；第三步，如果自己加工满足不了公差要求、方法困难、缺少设备或者有较高的危险性，我们会联系淘宝或者交大附近的加工厂进行加工。

第一步，对于标准件的使用，我们首先充分利用了工训的各种已有资源，如连接和紧固用的螺钉螺栓，这对于我们节省成本提供了很大的帮助；而对于能使用标准件的部分，如带传动、蜗轮蜗杆传动、电机以及轴承等，我们都尽可能地选用了标准件。

第二步，对于自己可以进行加工的零件，我们利用学生创新中心的设备进行了一系列加工——使用钻床进行亚克力板的钻孔、使用普通车床进行轴和蜗杆的加工与倒角，使用人力锯进行轴的切割、使用激光切割机进行 10mm 以下亚克力板的切割、使用锉刀进行孔径和轴肩的微调，使用 3D 打印机进行手部零件的打印。这一部分对于我们的动手能力有了很大的提升，也很好地利用了周围的资源，节约了很大一部分加工成本。

第三步，委托校外相关厂商加工零件。由于现实条件的约束与加工需求之间的矛盾，我们对于无法利用学校资源加工的一些零件，委托给了淘宝与阿里巴巴加工商或者是灯辉路的上海银燕光电仪器厂进行加工，其中包括 20mm 厚亚克力板的切割、亚克力板的铣削、蜗杆的数控车床加工、厚齿轮与带轮的开键槽、公差要求较高的轴与杆的加工、材质要求较高的手部 3D 打印件的制作等等。

4.1.3 加工中遇到的问题及解决方法

万事开头难，在准备的过程中我们也难免遇到了各式各样的困难与问题。

一，对于采用了就使用碳纤维板和亚克力板作为主要材料进行了讨论，后来经过与商家联系得知使用碳纤维板进行加工的预算是使用亚克力板的五倍，远远超出了我们的总预算，并且亚克力板的强度与加工性也已经满足我们的加工需求，因此我们最终选择了亚克力板。

二，对于手部构件的 3D 打印，我们发现学校的 3D 打印机打印出来的产品表面粗糙，与我们进行食品夹取的需求的不符，因此我们将与食物接触的部分委托给了校外厂商进行 3D 打印。

三，由于我们很多零件需要开键槽，如蜗杆、轴、手部齿轮，但学生创新中心又没有相应的插床设备，因此我们更改了设计，并且联系了剑川路地铁站附近的上海银燕光电仪器厂进行加工。

四，由于学生创新中心不能切割 10mm 以上的亚克力板，且无法对其进行铣削，而我们的设计中大臂的厚度是 20mm 厚且需要铣削以配适电机，所以我们联系了郑州的一家加工厂进行了相应的亚克力板的加工。

4.2 机构的装配

4.2.1 基座的装配

4.2.1.1 基座装配过程

对于基座的装配，由于蜗杆与轴承之间是过盈配合，所以我们首先进行了 86 支架、轴承固定架与 6003 轴承的配合，再将车削加工号的蜗杆与轴承配合，再安装底座电机和联轴器，将这部分构件装配完成后一起固定在已经打好孔的定位底板上，最后从下到上安装轴承垫片、推力轴承和底基座涡轮。

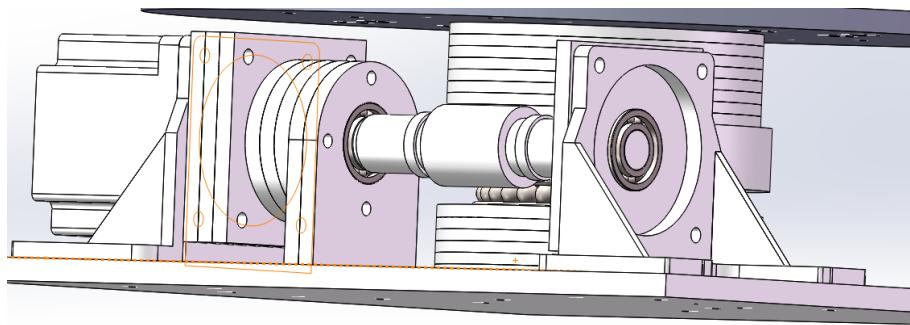


图 4-1 基座装配图

Figure 4-1 Assembly drawing of foundation

4.2.1.2 遇到的问题及解决方法

装配基座的过程中，我们遇到的最大的问题就是上方云台的螺栓在进行旋转时会与基座上的电机相撞，导致无法进行 360° 周转，甚至会引起联轴器的损坏。但是我们发现学生创新中心提供的 M5 螺栓只有 30mm 和 40mm 两种规格，使用 30mm 螺栓太短而无法完成装配，而使用 40mm 螺栓会过长而导致上述的干涉问题。因此我们决定使用手工锯将 40mm 螺栓锯断成 36mm 的非标准件，从而满足了我们的装配需求。

因为我们装配 40mm 螺栓时使用了防松螺母，且底座位置很低，因此我们在重新更新螺母时花费了很大的人力功夫，这也是给了我们一个惨痛的教训——事无巨细，以后装配前也要考虑好螺栓等小零件的干涉问题，不能图快而事倍功半。

4.2.2 机械臂的装配

4.2.2.1 机械臂装配过程

由于机械臂比较复杂，我们采用了从部分到整体，从难安装到易安装的顺序逐步装配的。对三段臂先进行分别的组装，安装上相应的轴承、转轴、心轴、电机、带轮与同步带、涡轮和蜗杆以及联轴器，再按照从下到上的顺序逐节装配，在两侧加上肋板，使用螺母和螺栓进行最终的固定。

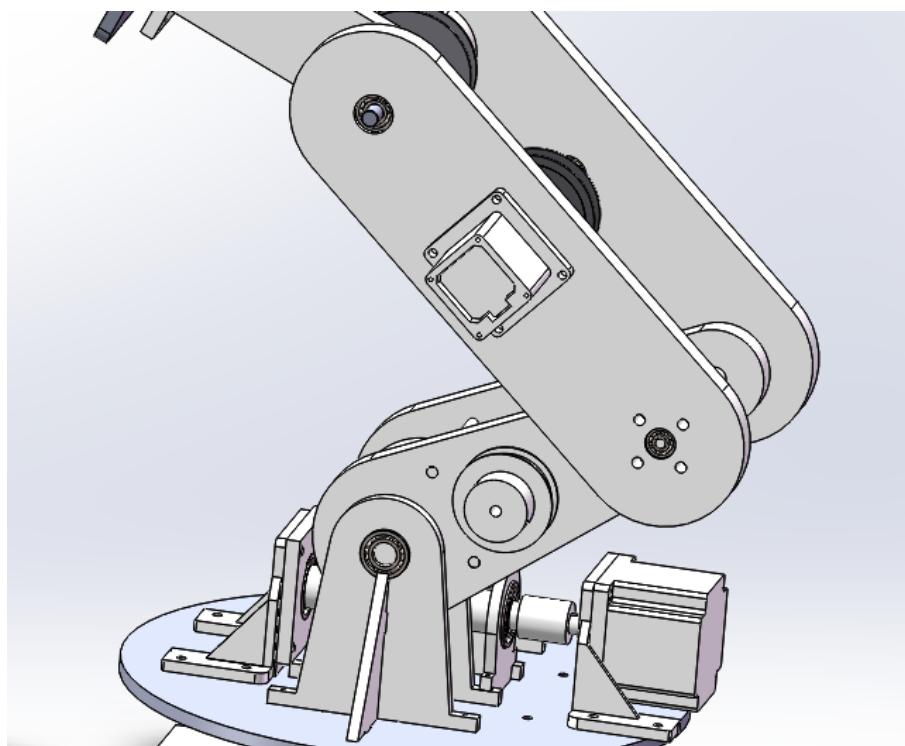


图 4-2 机械臂装配图
Figure 4-2 Assembly drawing of mechanical arm

4.2.2.2 遇到的问题及解决方法

在机械臂的装配过程中，我们也需要了很多问题。首先是装配顺序的问题，由于我们首先进行了两个大臂的装配，发现电机受力很大，于是就在大臂上进行打孔，用心轴进行分担受力和弯矩。但由于重新拆装添加心轴十分麻烦，我们就利用手动车床对心轴进行了车削加工，从而顺利完成了装配；在进行机械臂整体装配的过程中，我们发现由于上方整体重力过大而导致云台上方固定部分容易侧翻，因此我们又为支座添加了角铁，最终得以紧固；在委托厂商进行加工的时候，我们也没有为亚克力板的切割提供公差余量，因此在安放轴承和电机的时候绝大部分都是过盈配合，我们通过锉刀进行了扩孔、通过车床减小了轴的直径，完成了过盈配合。

4.2.3 机械手的装配

4.2.3.1 机械手装配过程

对于机械手的装配，我们也是根据从难到易的顺序，先安装最难进行配合的，再对较易配合的逐步安装，从而有一马平川的效果。先是将机架横板与齿轮、电机进行配合，再通过深沟球轴承安装伞齿轮，最后完成机架竖板和机械爪各配件之间的装配。

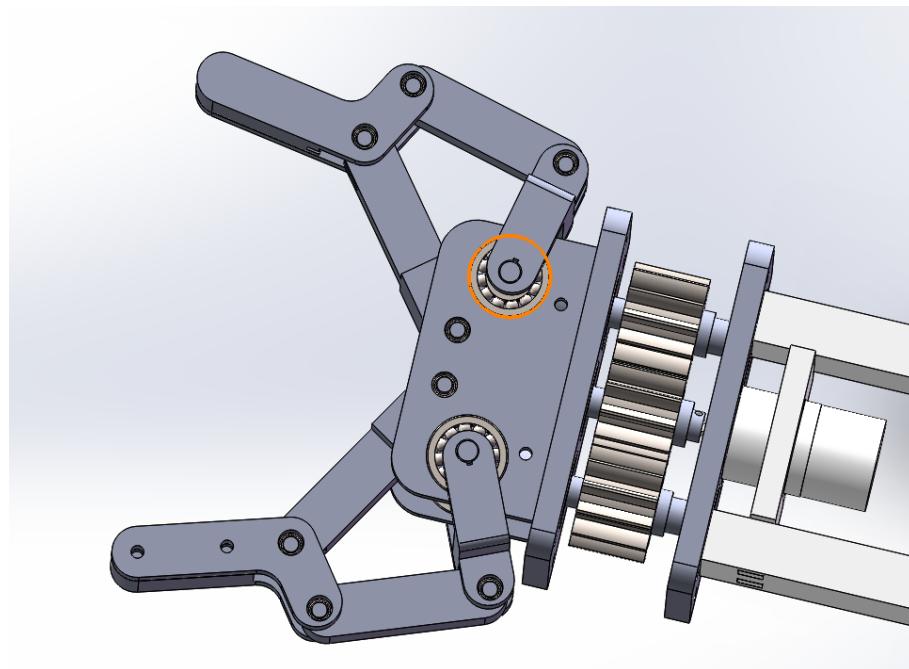


图 4-3 机械手装配图
Figure 4-3 Assembly drawing of manipulator

4.2.3.2 遇到的问题及解决方法

在机械手的装配过程中，我们发现 3D 打印并不能很好的生成螺纹，于是我们利用直径略大的螺栓进行了旋转配合，由于 3D 打印件塑性很高，因此在配合的过程中自己形成了螺纹纹路。在进行直齿轮和伞齿轮轴的配合中，我们发现键槽由于较小而不需要键连接就能完成过盈配合，因此也进行了直接配合的改进策略。

第五章 机电控制系统

5.1 电机选型

由本项目的结构设计可知，整体共有五个自由度，需要五个电机进行驱动。鉴于机械臂及云台转动角度的精准度要求较高，本项目的机械臂部分均采用步进电机进行驱动。而手部仅要求简单控制电机轴正反转即可，因此手部选用直流有刷电机。

接下来将根据各个关节输入的需求，分析电机的选型。

1. **云台：** 经过搜索，我们能买到的较大扭矩的步进电机（86 步进电机，如图 5-1）可以提供约 $4N \cdot M$ 的扭矩，经过与蜗轮蜗杆的配合减速，正常运行时能产生约 $200N \cdot M$ 的扭矩，以及约 3.5 转/分的转速，可以满足对云台的驱动要求。
2. **1号臂：** 由于 1 号臂所承受的载荷最大，驱动 1 号臂需要的扭矩也较大，因此同样选择与云台相同的大型 86 步进电机（ $4N \cdot M$ 型），经过蜗轮蜗杆的配合减速，正常运行时能产生约 $150N \cdot M$ 的扭矩，经 Matlab 核算，可以满足 1 号臂的扭矩需要，减速后的转速最快可至 6 转/分，也足够满足需求。
3. **2号臂：** 由于 2 号臂与 3 号臂部分没有外加减速机构，因此选用电机时需要直接选用减速电机增大输出扭矩，且本身体积与质量不能过大，否则对 1 号臂负担过大。经过选择，2 号臂最终采用了减速比 1:99 的 42 减速电机（ $0.7N \cdot M$ 型，如图 5-2），减速后的输出扭矩可达 $69.3N \cdot M$ ，转速接近 2 转/分，可以满足 2 号臂的转动需要。
4. **3号臂：** 3 号臂与 2 号臂要求类似，只是需要的扭矩较 2 号臂小一些，因此采用扭矩为 $0.55N \cdot M$ ，减速比 1:99 的 42 减速电机，减速后的输出扭矩约为 $54.45N \cdot M$ ，转速同样为 2 转/分，可以满足 3 号臂的转动需要。
5. **手部：** 根据上文中手部结构的设计，夹取时需要的输入扭矩大约为 $0.5N \cdot M$ ，故选用了减速比为 1:142 的直流减速电机（如图 5-3），其最终输出扭矩可达 $0.6N \cdot M$ ，满速转速为 30 转/分，可以满足手部输入的要求。

综上，电机部分的选型如下：云台：86 步进电机（ $4N \cdot M$ ）

1 号臂：86 步进电机（ $4N \cdot M$ ）

2 号臂：42 减速步进电机（ $69.3N \cdot M$ ）

3 号臂：42 减速步进电机（ $54.45N \cdot M$ ）

手部：直流减速有刷电机（ $0.6N \cdot M$ ）

86 步进电机型号：86BYG250B

转速：200 转/分 扭矩： $4N \cdot M$ 机身长度：80MM

轴径：14MM 电机电流：4A 出线：二相四线

42 步进电机型号：42BYGH47/42BYGH60

转速：200 转/分 扭矩： $0.55/0.7N \cdot M$ 机身长度：48/60MM 轴径：5MM

电机电流：1.5A 出线：二相四线 减速箱长度：48MM 减速比：1:99



图 5-1 86 步进电机

Figure 5-1 Step motor: model 86



图 5-2 42 步进减速电机

Figure 5-2 Step motor: model 42

直流有刷电机型号: XD-37GB520 (带减速箱)

输入电压: DC12V 负载电流: 0.68A 整体重量: 约 210g 额定功率: 7W

减速比: 1:99 减速箱长度: 28MM 输出转速: 30 转/分 输出扭矩: 0.6N · M



图 5-3 直流有刷电机

Figure 5-3 DC brush motor

5.2 驱动器选择

5.2.1 步进电机驱动

86步进电机驱动器型号：DM542

具体参数:脉冲信号: 3.3V/5V/24V 兼容

细分设定: 400-25600 细分

输入电压: 直流 DC12V-50V

电流范围: 1.0A-4.0A

42步进电机驱动器型号：DM542C

具体参数:脉冲信号: 3.3V/5V/24V 兼容

细分设定: 400-25600 细分

输入电压: 直流 DC20V-50V

电流范围: 1.0A-4.2A

5.2.2 直流电机驱动

驱动器型号: L298N 直流电机驱动芯片 蓝色版

具体参数:驱动电压范围 Vs: +5V-35V 逻辑电压范围 Vss: +5V-7V

控制信号和使能信号电压: 低电平-0.3V-1.5V 高电平 2.3V-Vss



图 5-4 DM542

Figure 5-4 DM542



图 5-5 DM542C

Figure 5-5 DM542C

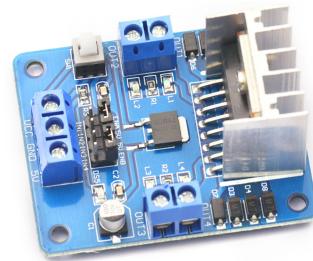


图 5-6 L298N

Figure 5-6 L298N

5.3 电源选择

5.3.1 供 DM542 驱动器

产品型号: S-250W-24V

直流输出电压: 24V

输出电流: 0-10A

输出功率: 250W



图 5-7 250W 电源

Figure 5-7 250W source

5.3.2 供 DM542C 驱动器

产品型号：S-100W-24V

直流输出电压：24V

输出电流：0-4.2A

输出功率：100W



图 5-8 100W 电源

Figure 5-8 100W source



图 5-9 12V 电源

Figure 5-9 12V source

5.3.3 供 L298N 驱动器

产品型号：YSN-1203000 锂电池组

直流输出电压：12V

5.4 传感器选择

本项目仅有手部需要传感器进行夹取力度的控制，考虑到对传感器有尺寸小、质量轻、灵敏度高等要求，最终选用了薄膜式压力传感器，将其固定于抓手内侧。

传感器型号：RP-C7.6-ST 外径：7mm 量程范围：2g-1.5kg



图 5-10 压力传感器

Figure 5-10 Pressure sensor

5.5 控制板选择

本项目选用 arduino UNO 作为机电系统的控制板，其输出端口数量与数据处理能力足够满足本项目需求。



图 5-11 arduino UNO

Figure 5-11 arduino UNO

全文总结

经过我们小组成员的不懈努力，我们的机械臂最终还是能够成功夹取东西并移动到指定位置。就课程设计的完成度而言，我们自认为还是比较高的，在 11 日的项目展上也不出意外的斩获了“最佳人气奖”。

但是从细节上来看，我们的装置还有几点问题：

1. 云台直接压在推力球轴承上，因为推力球轴承不能承受径向力的缘故，我们这样设计的云台稍微一点倾覆力都不能承受。如果不把握好重心，稍有不慎就有可能从基座上翻倒下来。
2. 蜗轮和云台主轴之间的配合不够紧密，键的两个工作面和蜗轮键槽的两个工作面间有较大侧隙。这导致传动时有冲击，而且有些位置不能稳定住。
3. 大臂与前臂相连的动力传递形式设计不合理：在悬伸端布置了一个同步带轮。因为同步带轮在工作时会对轴产生一个较大的径向力，从而把轴弄变形。这个地方应当考虑齿轮等依赖周向力传递动力的高副。
4. 重心把握不稳妥，手部应该还能减轻很多重量，用亚克力板材做的手臂两板太厚、太重。

当然技术上这些问题都是可以被修复的，并且被修复之后我们的成本会进一步降低，所以这些缺陷也正是我们的发展空间所在。

参考文献

- [1] 秦大同, 谢里阳. 现代机械设计手册. 第二卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.

致 谢

汤逸磊：感谢学校提供场地与加工材料，感谢盛鑫军老师和欧阳崛助教的指导与帮助，感谢所有其他帮助过本项目的人们，最后，感谢我的队友：谭正、徐哲、耿梓航、赵启，没有他们的付出，项目无法成功。

徐哲：本次项目的顺利完成要感谢许多老师和同学对我们的帮助和支持，这其中包括助教与课程老师对我们设计上的答疑解惑与宝贵建议，工训的值班老师和助管学长在部分加工换届给出的解决方案和设备支持，许多其它组的成员为我们出谋划策、借用工具，以及一些论坛网友所提供的电控教学和指南。感谢所有给予我们帮助的人们，让我们能够在圆满完成这次项目的同时，积累宝贵的经验。

赵启：感谢盛鑫军老师的高质量教学和整个项目从始至终宝贵意见和建议的提出，感谢欧阳崛学长的督促，指导与鼓励，感谢机动学院开设这门对学生理论专业知识和实际动手实践能力都有很大提升的课程，感谢学生创新中心陶波老师对于我们加工的帮助以及中心资源的提供，感谢组员们的互相帮助和学习。

谭正：感谢小组成员们的积极配合，我们项目的成功离不开你们每一个人；感谢盛鑫军老师给我们小组的批评和教诲，我们从中也学到了很多；感谢助教欧阳崛学长对我们项目的点拨和启发，有些细节真的是多亏了学长我们才真正弄清楚。

表 -1 expenditure statistics

购买物品	数量	总价	购买处	购买人
亚克力专用光油自喷漆	3	39.6	淘宝	汤逸磊
铝合金梅花联轴器	1	38	淘宝	汤逸磊
橡胶同步带	3	68.3	淘宝	汤逸磊
手构件（3D 打印）	1	490	淘宝	汤逸磊
手构件（3D 打印）	2	100	淘宝	耿梓航
伞齿轮、锥齿轮	2	23.45	淘宝	耿梓航
不锈钢内六角螺丝 M4*80	5	4.1	淘宝	耿梓航
不锈钢内六角螺丝 M3*60	10	9	淘宝	耿梓航
扭簧 0.6*6*2	10	8.9	淘宝	耿梓航
扭簧 0.8*6.4*2	10	8.9	淘宝	耿梓航
齿轮与同步带、蜗轮蜗杆	15	378.2	淘宝	耿梓航
开式轴承 6201	10	34.2	淘宝	耿梓航
铝合金梅花联轴器	2	18	淘宝	耿梓航
90° 角铁	10	5.74	淘宝	耿梓航
轴承 MR106ZZ	18	20.84	淘宝	耿梓航
86 步进支架	2	80	淘宝	徐哲
86 步进支架与 86 电机套装	2	282	淘宝	徐哲
42 行星减速步进电机与配件	4	274.5	淘宝	徐哲
42 行星减速步进电机与支架	2	218.7	淘宝	徐哲
42 步进电机套装	1	88	淘宝	徐哲
电压转换模块	1	44	淘宝	徐哲
12V 直流电机	1	40.8	淘宝	徐哲
86 步进电机套装与配件	2	340	淘宝	徐哲
稳压电源模块	1	19.06	淘宝	徐哲
12V 锂电池组	1	49.80	淘宝	徐哲
L298N 驱动模块与面包板	2	27.12	淘宝	徐哲
6003 轴承、6201 轴承	4	14.8	淘宝	谭正
铝合金梅花联轴器	2	36	淘宝	谭正
6003 轴承、6201 轴承	4	16.10	淘宝	谭正
6001 轴承	2	10.60	淘宝	谭正
不锈钢螺丝、键	27	50	淘宝	谭正
亚克力板	2	169.9	淘宝	赵启
亚克力板加工	2	30	淘宝	赵启
亚克力板加工	2	75	淘宝	赵启
亚克力板加工	4	120	淘宝	赵启
亚克力板加工	14	630	淘宝	赵启
光轴	3	42	淘宝	赵启
同步带 5M-465	1	18.5	淘宝	赵启
台阶轴加工	11	1100	阿里巴巴批发网	赵启
蜗杆车床加工	1	第 40 页 共 42 页	上海市闵行区君浩模具维修部	赵启
齿轮、带轮线切割	1	220	上海市闵行区君浩模具维修部	赵启