



**北京航空航天大学**  
B E I H A N G U N I V E R S I T Y

**第三十二届“冯如杯”学生学术科技作品竞赛  
项目论文**

**基于 FreeRTOS 的  
食品存储烹饪一体化智能售货机**

## 摘要

本文介绍了一种可实现食品存储烹饪一体化操作的智能售货机。基于功能解耦思想将本机电产品一体化操作流程分为食材存储模块、食材提取模块、烹饪模块以及出餐模块，各模块由相应动作机构实现。嵌入式控制架构基于 FreeRTOS 实时操作系统，构建了包含直流无刷电机闭环控制、舵机控制以及零位传感器的实时控制系统。本产品弥补了无人化食品存储烹饪一体化技术在售货机应用的空白。

**关键词：**食品机械，智能售货机，RTOS，嵌入式控制

## Abstract

This paper introduces a smart vending machine which provides integrated operations combining food storage and cooking. Based on the principle of functional decoupling, the integrated operations of the product are disassembled into four modules, including food storage module, food collection module, cooking module and food delivery module. Each module is realized by certain mechanisms. Embedded control framework constructed a real-time control system consisting the brushless DC motor closed-loop control, the servo motor control and zero sensor based on the FreeRTOS real-time operating system. This product makes up for the vacancy of unmanned storage& cooking technology applied on vending machine.

**Key words:** food machinery, smart vending machine, RTOS, embedded control

# 目录

一、	引言 .....	1
二、	功能模块设计工作 .....	1
2.1	食材存储模块 .....	2
2.1.1	需求分析 .....	2
2.1.2	结构设计 .....	2
2.2	食材提取模块 .....	2
2.2.1	需求分析 .....	2
2.2.2	机构及结构设计 .....	2
2.3	调料输送模块 .....	5
2.4	烹饪模块 .....	5
2.4.1	需求分析 .....	6
2.4.2	材料选用以及机构设计 .....	6
2.5	出餐模块 .....	6
2.5.1	设计方案构思 .....	6
2.5.2	机构及结构设计 .....	7
三、	实时控制系统架构与实现 .....	8
3.1	功能模块层 .....	9
3.1.1	DJI 无刷动力系统模块 .....	9
3.1.2	舵机模块 .....	12
3.1.3	继电器-电磁铁模块 .....	13
3.2	业务逻辑层 .....	13
3.2.1	抽屉盒定位业务 .....	14
3.2.2	食材提取业务 .....	14
3.2.3	食材翻转入锅业务 .....	14
3.2.4	烹饪业务 .....	14
3.2.5	出餐业务 .....	14
3.3	应用程序层 .....	15

四、	实验与测试 .....	16
4.1	硬件平台搭建 .....	16
4.2	业务功能验证 .....	17
4.2.1	定位业务测试.....	17
4.2.2	提取业务测试.....	19
4.2.3	入锅业务测试.....	20
4.2.4	烹饪业务测试.....	20
4.2.5	出餐业务测试.....	21
结论.....	.....	22
参考文献 .....	.....	23

## 一、引言

自动售货机作为一种便利的商务工具兴起于二十世纪六十年代，是经济结构由劳动密集型与资源密集型向技术密集型转变的产物<sup>[1]</sup>，其不受空间、时间以及人力因素的特点无不契合着如今生活节奏、工作节奏加快的大环境。近些年来，随着“自动售货机+移动支付”这一支付方式的转变，自动售货机行业得以快速发展。不同形式的售货机也因此成为了被广泛关注并具有潜在商业价值的产品。

目前市面上常见的用于办公楼、教学楼的自动售货机主要有：零食&冷饮售货机、全自动鲜果榨汁机以及全自动鲜煮咖啡售货机。以上三款自动售货机基本满足了办公人士、学生非正餐饮食需求，却没有满足其正餐饮食需求。随着如今工作时长、工作/学习压力的倍增，以上两类人士在应急情况（如赶报告）下，对在本楼层或本大楼解决正餐问题的需求是极大的。

针对以上问题，本文将介绍一种基于实时嵌入式控制系统的具备食品存储烹饪一体化操作的智能售货机，用于解决即时就餐问题。该产品功能实现方面将根据具体功能形式划分不同模块，对应每一功能模块，分别使用常见机械传动方式设计相应传动机构以满足功能需求；结构方面选用兼顾强度以及便于拆装的材料；控制方面基于分层设计思想，将控制框架从控制顶层向下到底层划分为产品整体、机构以及电控个体，再从控制底层向上到顶层构建基于电控个体控制的机构协同动作的产品整体控制链。以上三方面将共同构建该产品在满足经济性、节能减排以及售货机封装尺寸下的食品存储烹饪一体化操作生态环境。

## 二、功能模块设计工作

本项目硬件架构旨在结合具体需求，通过结构设计、机构设计、动力源选择等方式构建食品存储烹饪一体化硬件生态系统。

基于功能解耦以及模块化思想，将项目工程硬件架构拆分为食材存储模块、食材提取模块、烹饪模块以及出餐模块。对于各独立模块，分析其具体功能需求，设计相应机构。通过下文相应模块的分析设计，从理论上实现了该产品食品存储烹饪一体化操作的全流程。

## 2.1 食材存储模块

### 2.1.1 需求分析

食材存储模块用于实现各类待烹饪食材（如蔬菜、肉类）的存储工作。该模块在结构方面要求为食材提取提供物理接口，在材料方面要求能够与食材直接接触。

### 2.1.2 结构设计

基于结构方面的需求，本项目设计了一种底部可翻转的多格抽屉盒结构（图 1）。

抽屉盒前端贴有磁铁贴片，用于电磁铁吸合并进行抽屉开关操作。每格底部由合页构成可翻转底板，实现抽出时食材自落下效果。改变抽屉拉出的长度，可以实现多格食材的提取（图 2）。



图 1 底部可翻转多格抽屉盒模型图



图 2 多格食材提取概念实现图

多格抽屉盒以阵列形式摆放，可以实现最大作业食材量的增减需求，同时考虑到材料需与食材直接接触，本项目采用亚克力板实现上述食材存储结构。

## 2.2 食材提取模块

### 2.2.1 需求分析

食材提取模块用于实现单次作业中烹饪食材的一次性提取以及入锅操作。该模块在结构方面要具有一定承载能力，且需要与储物柜具有良好的配合关系，以实现食材的提取；机械运动方面要实现对存储模块中具体食材对应的抽屉盒的定位，同时也需要具有对存储模块中抽屉盒的取出与放回功能，以及食材接收完毕的入锅操作。

### 2.2.2 机构及结构设计

针对抽屉盒定位需求，本项目设计了一种基于滚珠丝杆的 XZ 平面定位机构，其模



型概念图如下图所示。

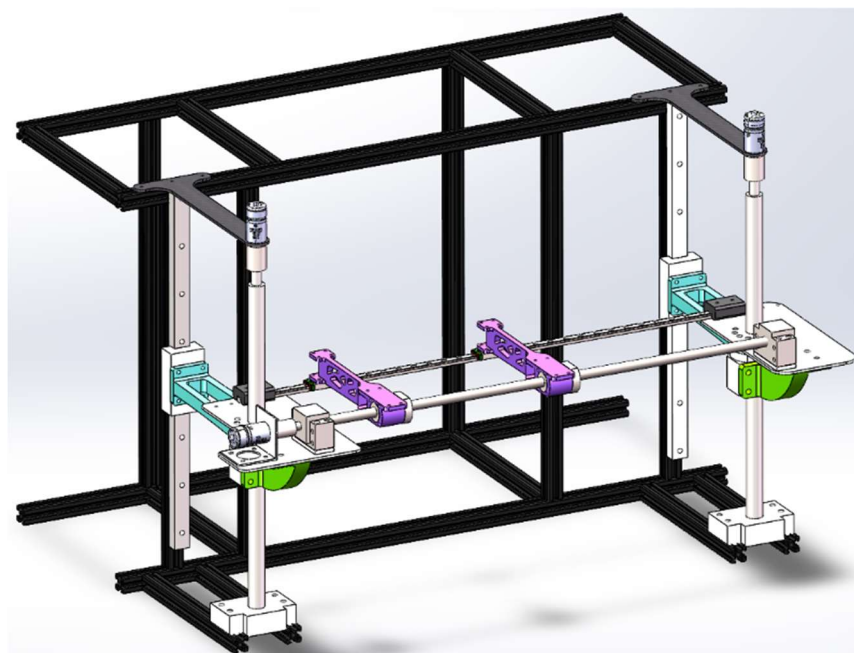


图 3 XZ 平面定位机构

该定位平台由 M2006 直流无刷电机驱动滚珠丝杆副提供 X、Z 向直线运动，为具体抽屉盒开关操作提供精确定位。其中，Z 向与支架固连结构固定，X 方向直接安装在 Z 轴平台上，可进行整体升降（图 4）。考虑到 X 向跨度较大，Z 向采用双丝杆同步运动方式实现该向运动需求。

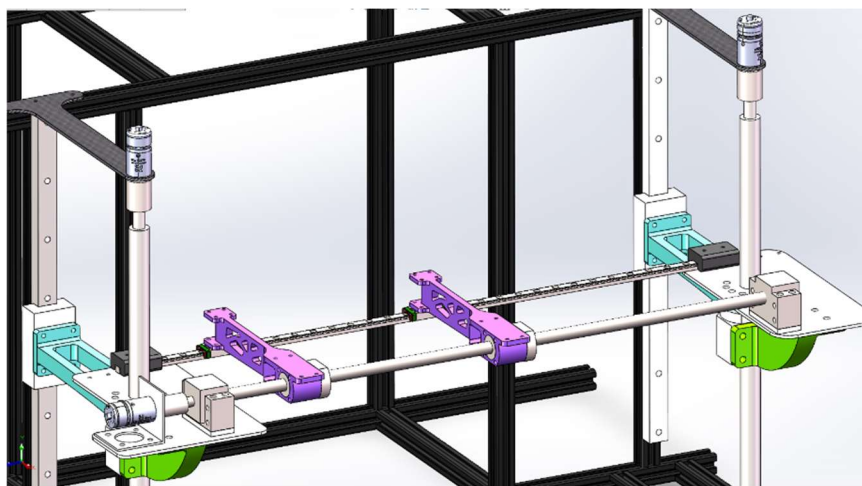


图 4 X 向丝杆传动进行整体升降

针对抽屉盒的取出与收回操作以及食材入锅需求，本项目在定位机构的 X 轴动平台上设计了基于齿轮齿条副的抽屉盒开关机构以及基于旋转副的翻转入锅机构，其概念模型图如图 5 所示。

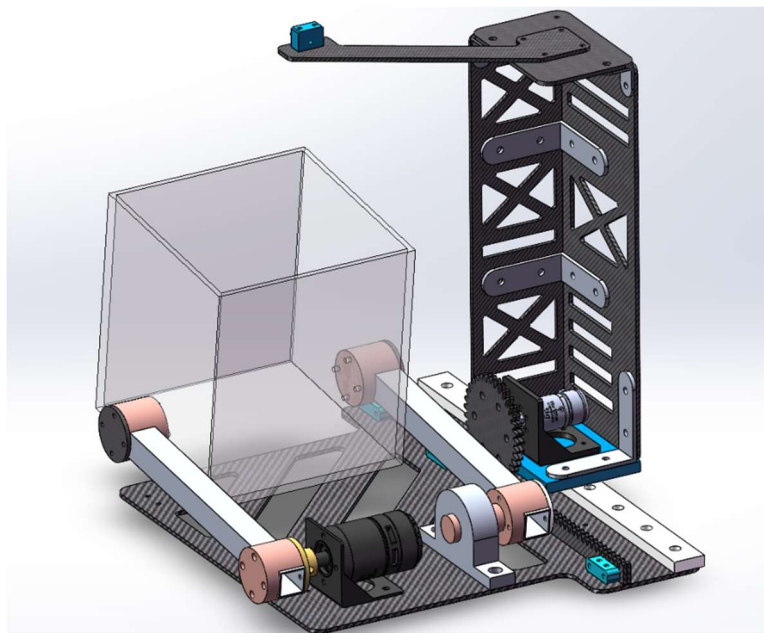


图 5 定位机构动平台模型图

抽屉盒开关机构中，齿轮通过联轴器连接 M2006 直流无刷电机固连在动平台导轨上，通过齿轮齿条副实现电机旋转运动向直线运动的转化，如图 6 所示。导轨上使用碳纤维板搭建电磁铁执行平台，实现对抽屉盒的吸合操作。电磁铁吸合配合导轨直线运动，实现特定抽屉盒特定格食材提取（图 7）。

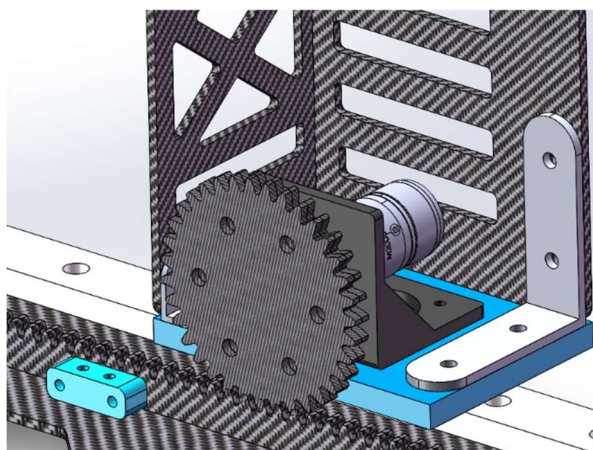


图 6 抽屉盒开关直线运动实现

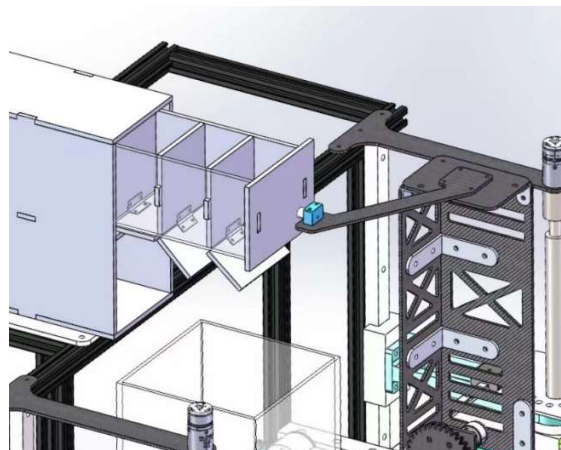


图 7 抽屉盒吸合及提取操作

如图 7 所示，掉落的食材由菜篮接收，该菜篮可由旋转臂带动旋转。考虑到转矩较大，选用 M3508 直流无刷电机作为动力源直接驱动旋转臂转动（图 8）。在特定对接位置时，利用食材转动惯性以及重力势能可将食材转移至锅中，实现食材入锅操作，如图 9 所示。

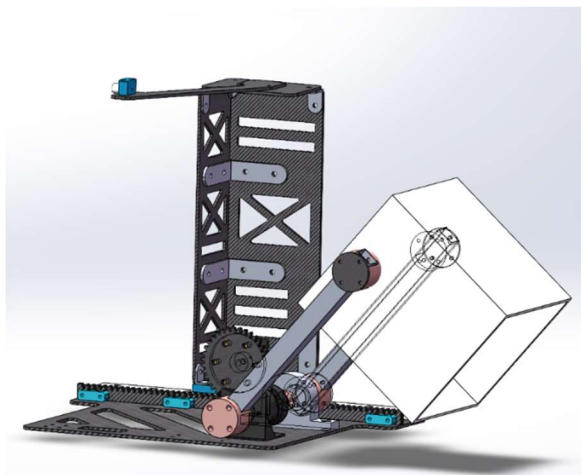


图 8 带旋转臂的菜篮

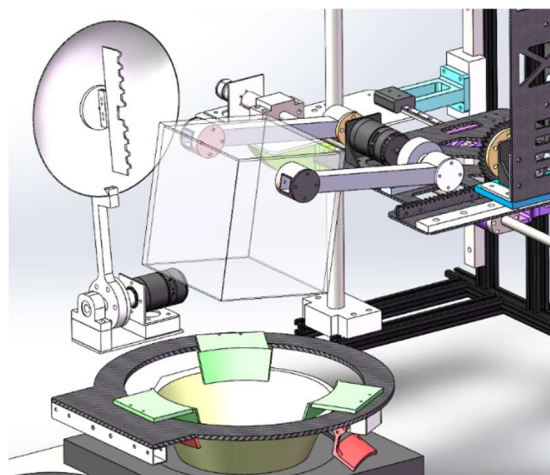


图 9 食材入锅操作

该模块结构方面，总体支承框架采用铝型材搭建，动平台采用碳纤维板作为基座，连接部分除标准件外均由打印件组成，在保证结构强度基础上也使得整体外观轻巧简洁。

## 2.3 调料输送模块

本项目工程调料输送模块采用蠕动泵、食品级橡胶管实现调料添加功能。其三维模型图如下所示：

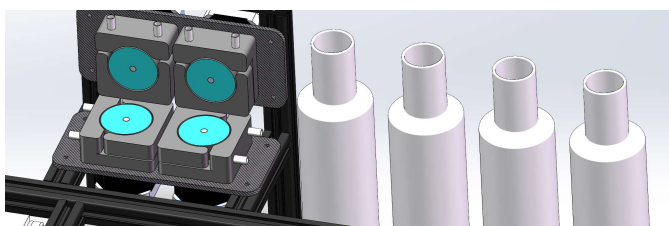


图 10 调料输送模块三维模型

其中蠕动泵通过 42 步进驱动，在泵进出口管道中形成压差，实现液体调料通过食品级橡胶管送出调料瓶，然后通过蠕动泵送入锅中。每个蠕动泵独立控制，能够较为精确实现进料控制，成本低，可根据需要配置调料数量，满足烹饪的多种口味需求。对于辣椒、盐等固态调料，可配成相应溶液通过相同方案运输。



图 11 蠕动泵



图 12 调料瓶

## 2.4 烹饪模块

### 2.4.1 需求分析

烹饪模块用于实现食材的烹饪，要求选用具备一次性出餐条件的容具盛放菜品，且需选用合适加热装置对其进行加热。针对加热过程热量流失以及传热不均问题，需要锅盖实现翻炒时闭合操作，以及铲勺实现翻炒操作。

### 2.4.2 材料选用以及机构设计

针对上述热源及容具需求，本项目选用电磁炉以及锡纸碗实现加热及菜品盛放。

对于锅盖开合功能，本项目使用 M3508 直流无刷电机直接驱动锅盖实现开合操作，如图 13 所示。

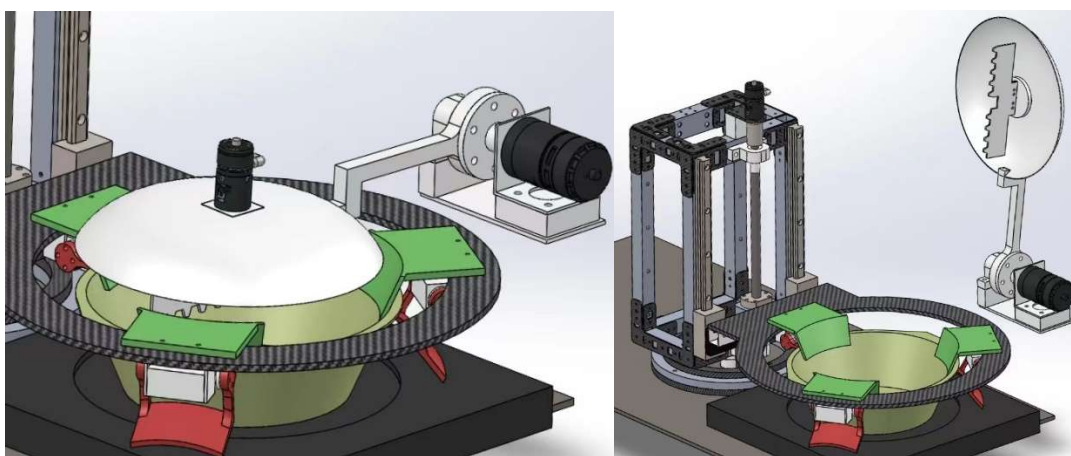


图 13 锅盖开合操作

通过 M2006 无刷直流电机直接驱动锅盖内部构建的翻炒铲勺（图 14），可以实现菜品翻炒功能。

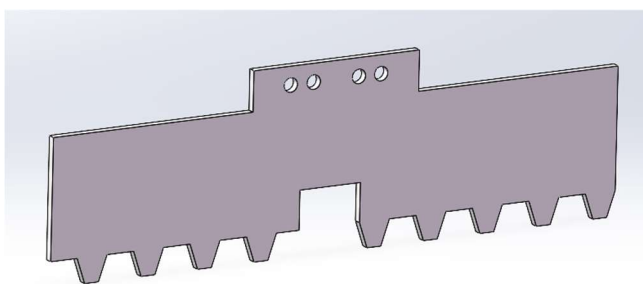


图 14 铲勺

## 2.5 出餐模块

### 2.5.1 设计方案构思

由于菜品的制作均在锡纸碗中进行，因此出锅与将炒菜最终交付给顾客仅需要将锡纸碗从锅中取出，并转移到出货口即可。



根据所需功能划分运动形式为 1. 对锡纸碗的抓取, 2. 将锡纸碗抬升一定高度出锅, 3. 将锡纸碗转移到售货机的出货口。

### 2.5.2 机构及结构设计

由以上运动形式对运动机构进行设计, 首先对锡纸碗的抓取部分选用三个舵机安装 3d 打印抓手 (图 15), 可以实现对锡纸碗的抓取与释放, 三个舵机在圆周上均布, 抓取牢固可靠。

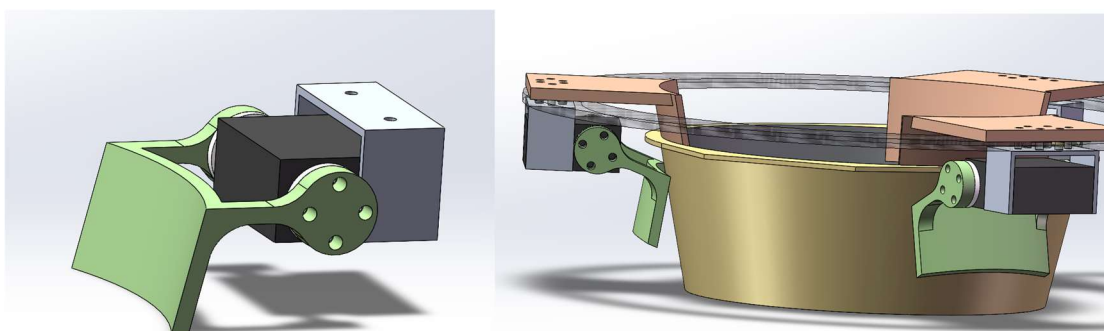


图 15 舵机抓手模型图

运动形式 2 和 3 进行了一体化云台设计, 所设计云台具有 1 个 Z 轴旋转自由度以及一个 Z 轴抬升自由度。旋转部分采用了餐桌轴承作为减摩和支撑元件, 采用了大疆的 M3508 电机进行直驱的传动方式, 精度可靠。抬升部分使用了滚珠丝杠作传动, 使用了 M2006 作为动力源, 丝杠两侧设计了两个直线导轨对丝杠旋转进行定位, 框架部分使用了铝方管加碳纤维板的方案, 连接可靠。

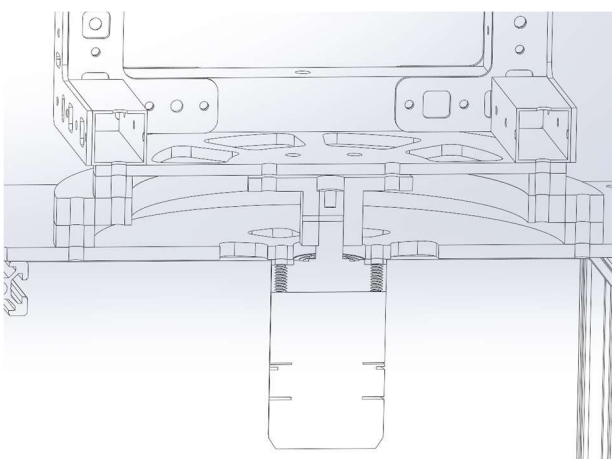


图 16 X 轴轴系线框图

所设计的该部分机构模型如图 17 所示, 其中左侧蓝色部分为电磁炉, 红色及绿色元件为 3D 打印的舵机夹爪, 右侧为 Z 轴 1R1P 云台。

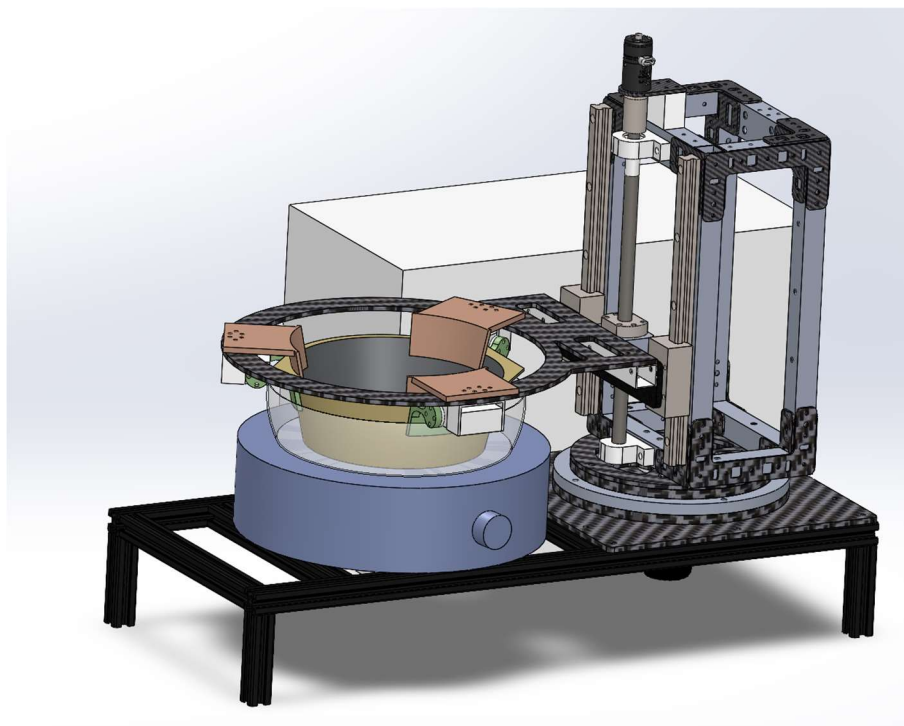


图 17 出餐模块整体模型图

### 三、实时控制系统架构与实现

本项目控制工程由基于 FreeRTOS 实时操作系统的 stm32 微控制器实现。微控制器选用以 STM32F427IIH6 作为主控芯片的 RoboMaster 开发板 A 型（以下简称 A 型板），其板载设有的 24V/12V/5V/3.3V 电源接口、双 CAN 总线接口、USART 接口、PWM 接口以及 SWD 调试接口，具备了本工程对 9 台 DJI 无刷直流电机、3 台舵机、继电器、零位开关以及电磁铁的控制及供电要求。

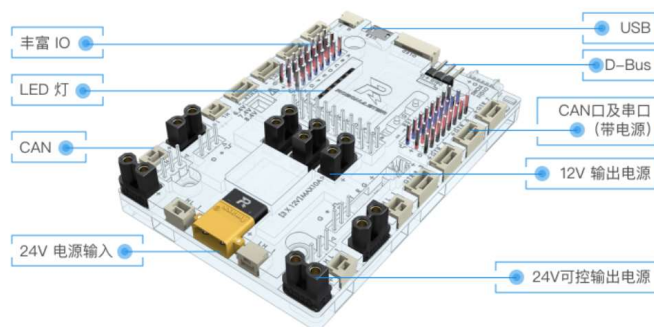


图 18 RoboMaster 开发板 A 型

软件工程架构方面，部署了 FreeRTOS 的 stm32 微控制器具备了多任务实时管理及决策功能，可以实现相当程度的无人化自治，满足了食品存储烹饪一体化、无人化的先决条件。控制系统设计思想基于分层设计以及模块化设计，其中，分层设计旨在构建从

底层被控元件到中间层各机构操作业务，再到顶层整体项目工程运作的自下而上的桥梁；模块化设计旨在实现将项目工程解耦为各独立业务，独立业务解耦为各独立被控元件并进行相关封装便于调用操作的需求。针对本工程架构限制如下：低层提供相关接口给高层调用，不允许低层调用高层接口，也不允许跨层调用；各层各模块之间不允许相互调用。

### 3.1 功能模块层

该层为软件架构底层，旨在完成各独立被控元件的外设初始化及相关元件操作封装。封装后的接口提供给业务逻辑层（中间层）使用。各独立被控元件作为独立模块，相互无逻辑关系且不存在相互调用。其中，DJI 无刷动力系统模块作为本项目工程主要控制对象及主要控制难点，将花较大篇幅进行阐述。

#### 3.1.1 DJI 无刷动力系统模块

##### 1. 硬件介绍

本项目工程 DJI 无刷动力系统模块中共有 6 台 M2006+C610 以及 3 台 M3508+C620 待控。借助 CAN 总线与 C610 及 C620 无刷直流电调进行电流信息（即力矩信息）通讯，可实现 M2006 及 M3508 无刷直流减速电机的控制。考虑到一条 CAN 总线最多可控 7 台 DJI 无刷直流电调，本项目工程使用双 CAN 总线（CAN1/CAN2）搭配两块 RoboMaster 电调中心板（以下简称中心板），实现该模块的电路硬件搭建任务。

##### 2. 外设连接

查阅 A 型板原理图，使能 PD0、PD1 分别作为 CAN1 总线 RX、TX 引脚，PB12、PB13 分别作为 CAN2 总线 RX、TX 引脚，分别将其连接到两块电调中心板，完成 CAN 总线硬件连接。

##### 3. 功能分析

DJI 无刷电调仅提供电流（力矩）控制，而本项目工程机构业务中要求实现速度控制以及位置控制。同时，为了减小电机启停的冲击，避免机构结构损伤以及食品溢出，需要对位置控制部署基于五次多项式的单关节速度规划算法。最后，在走完速度规划后将电机控制形式转为位置闭环控制，以满足速度跟随后的位置误差修正以及保持力矩的需求。上述分析功能将在下文实现。

#### 4. 基于 PID 算法的三环控制框架实现

本项目工程采用 PID 算法实现 DJI 动力系统三环控制。离散化 PID 算法如下：

$$\begin{cases} Output = P_{out} + I_{out} + D_{out} \\ P_{out} = K_p \times Err \\ I_{out} = I_{out} + K_i \times Err \\ D_{out} = K_d \times (Err - LastErr) \\ Err = Target - Measure \end{cases}$$

其中，Target 为设定的目标量，Measure 为实时测量量，Err 为本次迭代控制，LastErr 为上一次迭代的误差。通过选取适当的  $K_p, K_i, K_d$  参数，可以实现对误差的减小乃至消除。将 PID 算法分别部署于位置调节以及速度调节，可以实现电机三环控制，控制框架如图 19 所示。

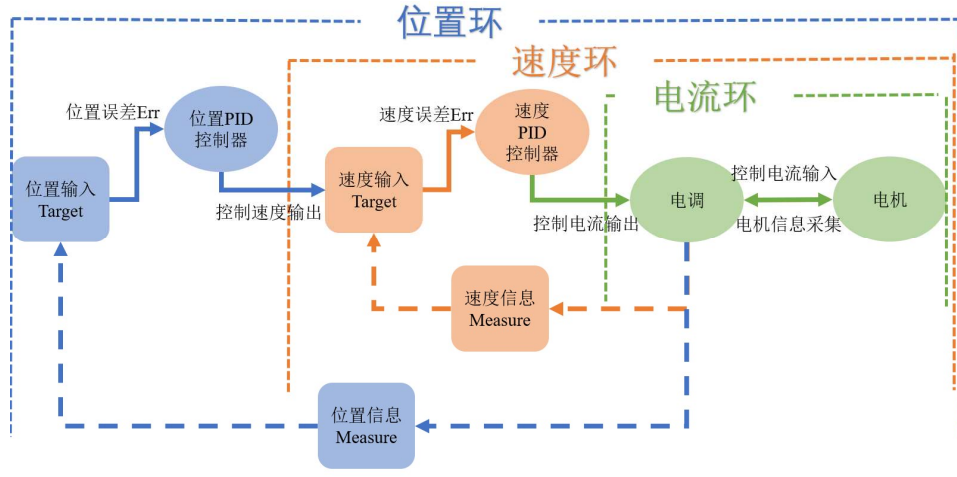


图 19 基于 PID 的三环控制框架

#### 5. 单关节无（小）冲击位置控制速度规划算法实现

本项目工程采用五次多项式进行速度曲线规划并跟随来实现位置控制，可以解决速度突变、加速度突变等冲击或不连续问题，其根据项目工程实际需求简化后有多项式系数求解结果如下：

$$\begin{cases} a_0 = 0 \\ a_1 = v_{start} \\ a_2 = 0 \\ a_3 = (20 \times s_{final} - 12 \times v_{start}) / (2 \times t_{final}^3) \\ a_4 = (-30 \times s_{final} + 16 \times v_{start}) / (2 \times t_{final}^4) \\ a_5 = (12 \times s_{final} - 6 \times v_{start}) / (2 \times t_{final}^5) \end{cases}$$

其包装成函数后，仅提供期望起始速度  $v_{start}$ ，期望路程  $s_{final}$  以及期望时间  $t_{final}$  即可得到求解后的五次多项式常系数组。



至此，本项目工程中面向 DJI 无刷动力系统的基于速度曲线跟随及位置环误差修正的精确位置控制框架已被完全建立，并可被描述如下：（1）给定目标位移及限定时间，得到基于五次多项式路径规划的常系数组；（2）电机在路径规划时限内进行速度环控制，速度环 Target 值为根据常系数组实时计算的结果，即对速度规划曲线进行跟随；（3）走完速度规划曲线后，将控制形式转为以目标位移为位置环 Target 值的位置环控制，用于对速度曲线跟随后的小误差（一般为转子端 1~15 转）进行修正。上述框架有示意图如下：

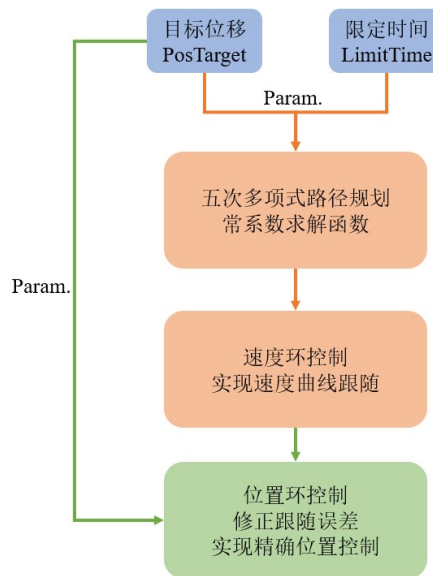


图 20 精确位置控制框架

将该精确位置控制框架应用于本项目机构控制时，在满足机构运动速度、加速度连续条件下，还实现了机器待机状态误差自修正，避免了每个运作周期都需要借助零位传感器复位的繁琐操作。

## 6. 基于 FreeRTOS 任务及中断管理的 DJI 无刷动力系统控制任务实现

由 4 小节所述，三环控制是基于电机实时迭代数据反馈以及控制电流周期性计算输入电机的闭环控制方法，即要求程序实现接收电机实时数据更新迭代，且周期性完成控制计算任务。经查阅 DJI 动力系统相关手册，电机反馈数据传输周期 1kHz，程序中采用中断接收实现报文接收任务，同时，为了避免中断占用实时系统时间过长，引入 FreeRTOS 提供的消息队列操作，将接收报文发送至报文队列 CAN\_RxQueue，由报文更新处理任务 StateUpdateTask 实现异步接收并处理；控制计算方面，创建电机计算控制任务 ControlTask，根据不同电机控制任务、形式进行控制电流计算迭代，并打包为报文发

送至总线上。有示意图如下：

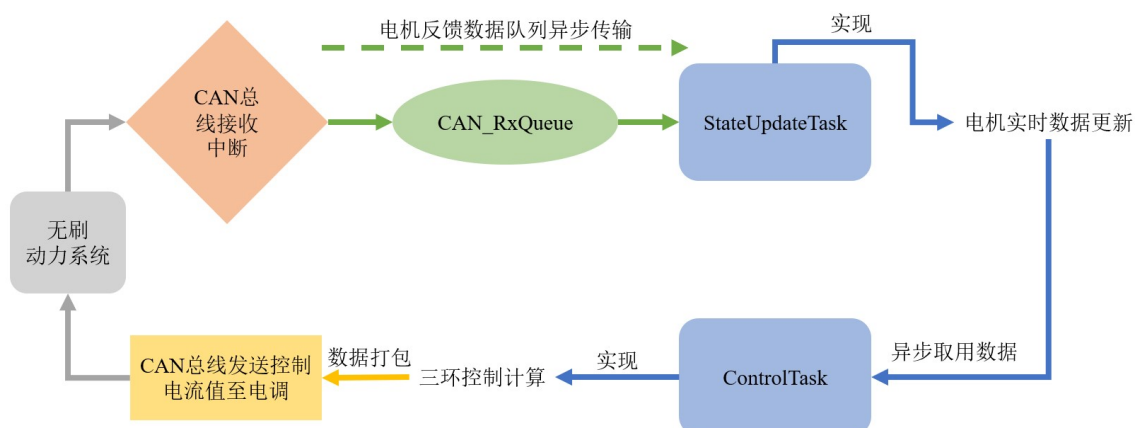


图 21 基于 FreeRTOS 的三环控制实现示意图

## 7. 函数封装接口

根据上述 DJI 无刷动力系统功能特性，有如下函数接口提供给上层调用：

表 1 DJI 无刷动力系统模块函数接口

函数接口声明	接口解释
DJIMotor_t* DJIMotorAllocate (DJIMotorInit_t* This)	用于为机构 申请电机使用
Void DJIMotor_SetTargetCur (DJIMotor_t* This, int16_t setCur)	设置机构电机电流值 (可用于断电)
Void DJIMotor_SetTargetVel (DJIMotor_t* This, float setShaftVel)	设置机构速度值 (用于匀速转动)
Void DJIMotor_SetTargetPosWithTime (DJIMotor_t* This, float setShaftPos, uint32_t setTime, float startVel)	设置机构位移量 (用于位置运动规划)

### 3.1.2 舵机模块

#### 1. 硬件介绍

本项目工程舵机模块中共有 3 台 20KG 双轴数字舵机待控。借助 PWM 脉宽调制技术，给定不同占空比信号，即可实现舵机控制。

#### 2. 外设连接

查阅 A 型板原理图，使能 PI0、PH12 与 PH11 分别作为 PWM 输出引脚，将其与 3 台舵机信号线连接，完成外设连接。

#### 3. 功能分析

本项目工程要求舵机实现锡纸碗抓取，即仅要求三台舵机在松开角 ANGLE\_UNLOAD 与夹取角 ANGLE\_UPLOAD 之间变换。其中松开角要求不与其他工

作干涉，夹取角要求稳定实现锡纸碗夹取，具体数值根据实验测定。

#### 4. 函数封装接口

根据上述舵机功能特性，有如下函数接口提供给上层调用：

**表 2 舵机模块函数接口**

函数接口声明	接口解释
ServoMotor_t* CreateServoMotor (TIM_HandleTypeDef *htim, uint32_t channel)	用于为机构 申请舵机使用
void SetServoMotor (ServoMotor_t *SMName, uint16_t angle)	设置舵机角度值

### 3.1.3 继电器-电磁铁模块

#### 1. 硬件介绍

该模块有一个四路 12V 继电器以及一枚 12V20N 电磁铁待控。通过使能继电器通断信号，来实现连接在继电器上的电磁铁吸力通断，从而配合齿轮齿条副达到抽屉盒启闭的功能。

#### 2. 外设连接

使能 PA0 作为 GPIO Output 通道，控制继电器启闭信号。电磁铁一端连接继电器 NO 端，另一端接地。以上操作完成该模块外设连接。

#### 3. 函数封装接口

针对继电器启闭操作，采用如下宏定义提供给上层调用：

**表 3 继电器-电磁铁模块宏定义接口**

宏定义接口声明	接口解释
#define MAG_ON HAL_GPIO_WritePin(MAG_PORT, MAG_PIN, GPIO_PIN_SET)	开启电磁铁
#define MAG_OFF HAL_GPIO_WritePin(MAG_PORT, MAG_PIN, GPIO_PIN_RESET)	关闭电磁铁

## 3.2 业务逻辑层

该层为软件架构中间层，旨在使用功能模块层（底层）各独立被控元件函数接口完成各独立机构对需求电机申请以及动作的封装。封装操作基于机构运动量与电机运动量关系构建机构动作函数，使得机构运动量设置更加直观。封装后的机构动作接口提供给应用程序层（顶层）调用。各独立机构（组）作为独立模块，相互无逻辑关系且不存在

相互调用。为方便本层论述，根据各独立机构实际使用功能关系组成相应功能业务。

### 3.2.1 抽屉盒定位业务

抽屉盒定位业务基于电机对 XZ 向丝杆操作实现，其中 X 向丝杆节距  $P_x=4\text{mm}$ ，Z 向丝杆节距  $P_z=5\text{mm}$ 。该业务需要申请三台 M2006 直流无刷电机。其中，Z 轴两台电机接受同样控制信号同时动作。构建该业务机构动作接口函数见表 4（本层论述末）。

### 3.2.2 食材提取业务

食材提取业务基于电机对齿轮齿条机构操作以及继电器对电磁铁操作实现，其中所选用齿轮齿条副分度圆直径  $74\text{mm}$ 。该业务需要申请一台 M2006 直流无刷电机。构建该业务机构动作接口函数见表 4。

### 3.2.3 食材翻转入锅业务

食材翻转入锅业务基于电机直接驱动转轴带动菜篮旋转实现。该业务需要申请一台 M3508 电机。该业务机构动作接口函数见表 4。

### 3.2.4 烹饪业务

烹饪业务基于电机直接驱动锅盖以及铲勺旋转实现。该业务需要申请一台 M2006 电机以及一台 M3508 电机。该业务机构动作接口函数见表 4。

### 3.2.5 出餐业务

出餐业务基于电机对丝杆操作以及直接驱动抬升机构实现，其中丝杆节距  $P=4\text{mm}$ 。该业务需要申请一台 M2006 电机以及一台 M3508 电机。构建该业务机构动作接口函数如表 4。

表 4 业务逻辑层机构封装接口函数

业务名称	函数接口声明	接口解释
抽屉盒定位业务	Void SetXaxisMove (float pTar, uint32_t limTime)	设置 X 轴丝杆机构运动量及限定时间
	Void SetZaxisMove (float pTar, uint32_t limTime)	设置 Z 轴双丝杆机构运动量及限定时间
食材提取业务	Void SetRackPinionMove (float pTar, uint32_t limTime)	设置齿轮齿条机构运动量及限定时间
食材翻转入锅业务	Void SetBasketRotate (float pTar, uint32_t limTime)	设置菜篮转动角度及时间
烹饪业务	Void SetCoverRotate	设置锅盖

	(float pTar, uint32_t limTime)	转动角度及时间
	Void SetShovelOn (float vTar) Void SetShovelOff (void)	设置铲勺转动速度 / 停止铲勺转动
出餐业务	Void SetLiftSysRotate (float pTar, uint32_t limTime)	设置丝杆抬升机构整体 旋转角度及时间
	Void SetLiftScrewMove (float pTar, uint32_t limTime)	设置抬升丝杆机构 运动量及限定时间

### 3.3 应用程序层

该层为软件架构顶层，旨在使用业务逻辑层（中间层）各独立机构运作函数接口实现本项目工程，即食品存储-转移-烹饪-出餐一体化操作。

借助 FreeRTOS 任务管理，构建两个任务块，分别管理一体化云台+烹饪模块与食材存储/提取模块的运行动作。两个任务块所管理的机构在关键汇合帧前可以进行各自的运行操作，在关键汇合帧时双方等待并接收对方的可汇合信号量，进行汇合动作后继续完成各自运行操作，在一个工期完成后复位并等待下一次操作。

本项目工程的关键汇合帧为食材入锅操作。在此操作前，一体化云台需将锡纸碗移动至食材可接收点，同时 XZ 定位机构需将菜篮所在动平台移动至食材可投递点。

根据上述内容构建顶层任务框架如下：

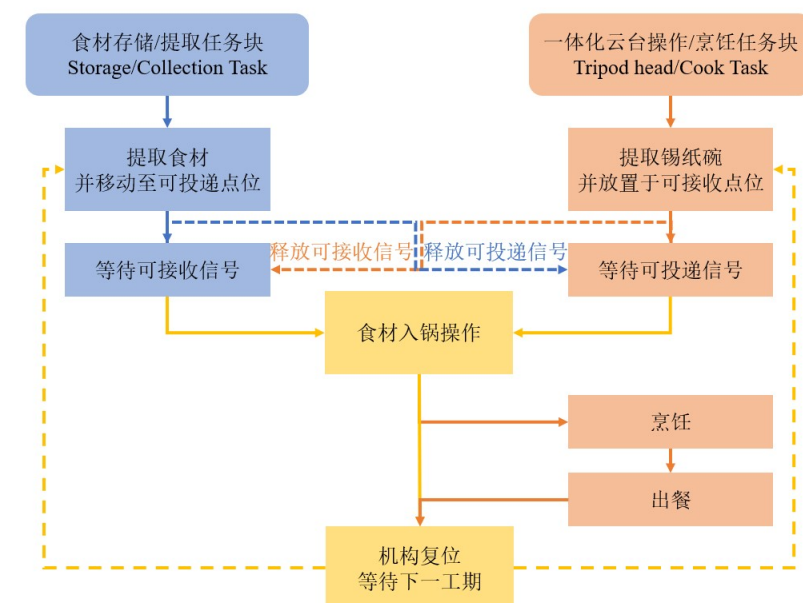


图 22 控制工程顶层任务框架

## 四、实验与测试

本项目工程基于第二章概念模型，搭建起实物硬件平台。针对实物的测试内容如下：

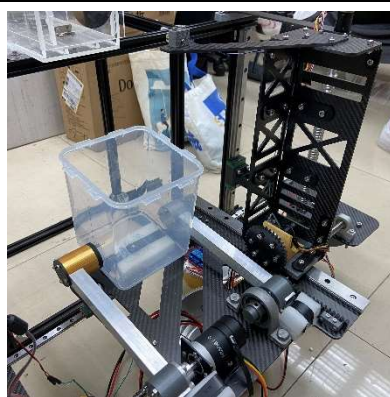
1. 对于各独立硬件业务模块，先进行单独测试，确保无机构本身缺陷。
2. 确保各模块无根源性缺陷后，进行模块间联合调试。
3. 确保各模块间无配合缺陷后，最后进行整体产品调试。

### 4.1 硬件平台搭建

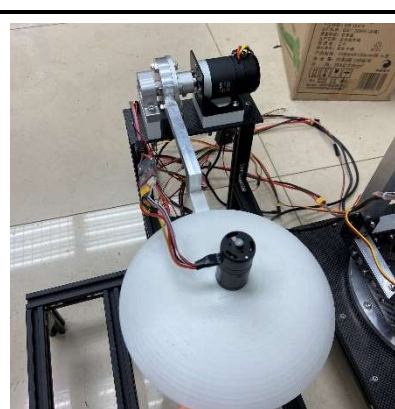
有搭建完成后硬件平台如下图：



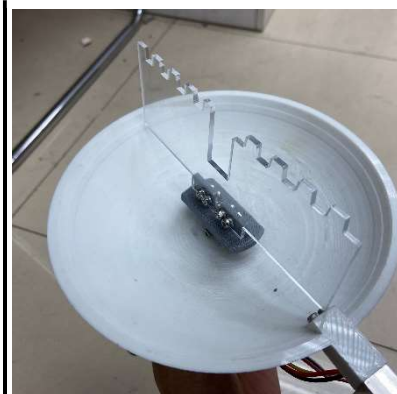
(a) 亚克力多格抽屉盒



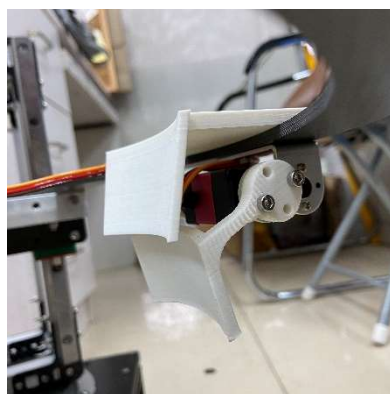
(b) 食材提取模块动平台



(c) 烹饪模块锅盖



(d) 烹饪模块铲勺



(e) 出餐模块舵机夹取装置



(f) 出餐模块 1R1P 云台



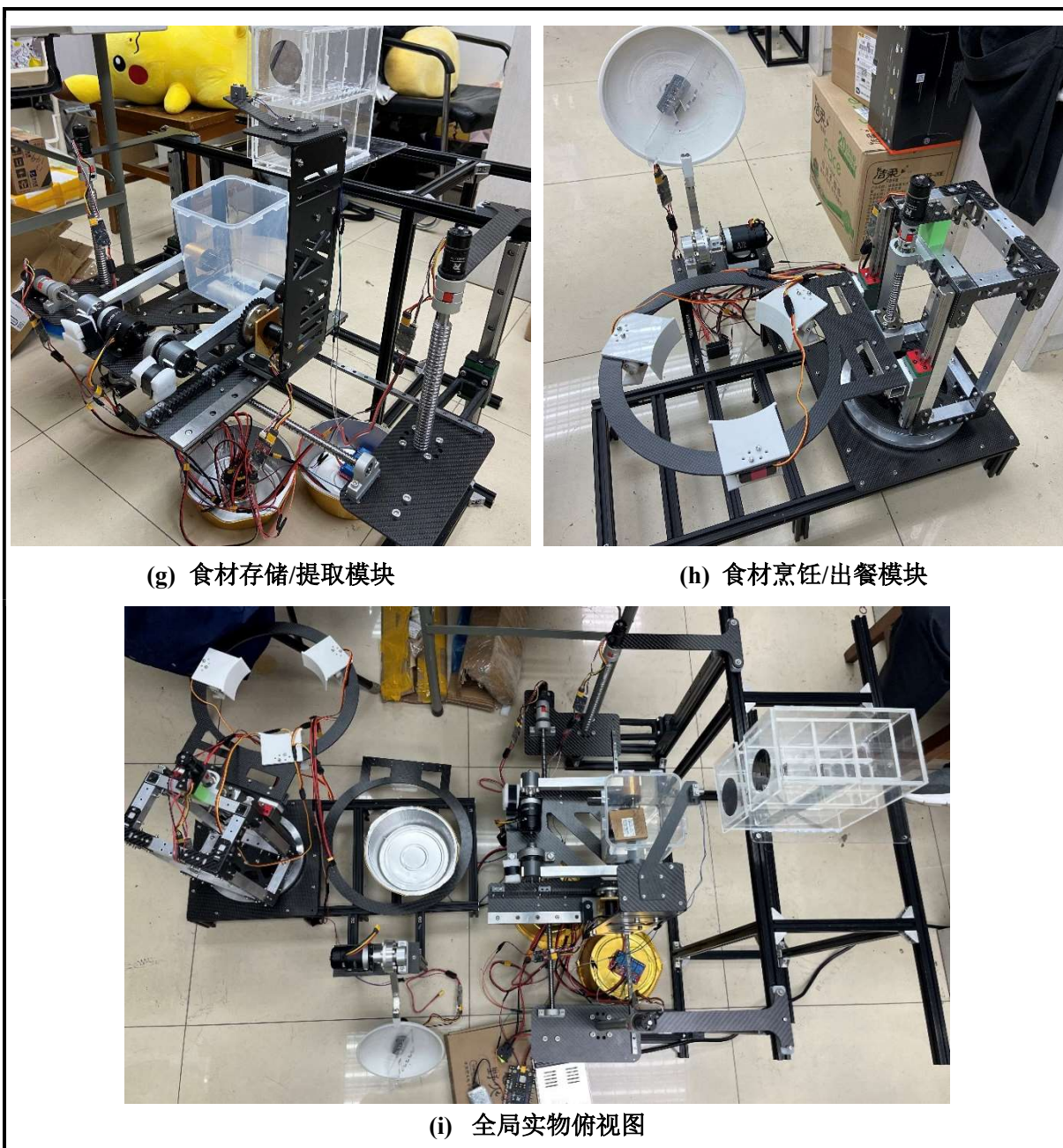


图 23 硬件实物平台

## 4.2 业务功能验证

本小节将分别对定位业务、提取业务、入锅业务、烹饪业务、出餐业务进行机械运动准确性验证（不涉及实际食材烹煮）。

### 4.2.1 定位业务测试

定位业务测试用于验证 XZ 定位平台对抽屉盒定位精确度。

对于 Z 向双丝杆同步传动，首先要确保传动的同步性，否则将对机械结构造成永久

性损害。指定测试流程为向下移动 50mm，停留 5 秒后向上移动 120mm。提取测试过程中两台电机转子端运动量误差数据并作图如下（采样频率 5Hz）：

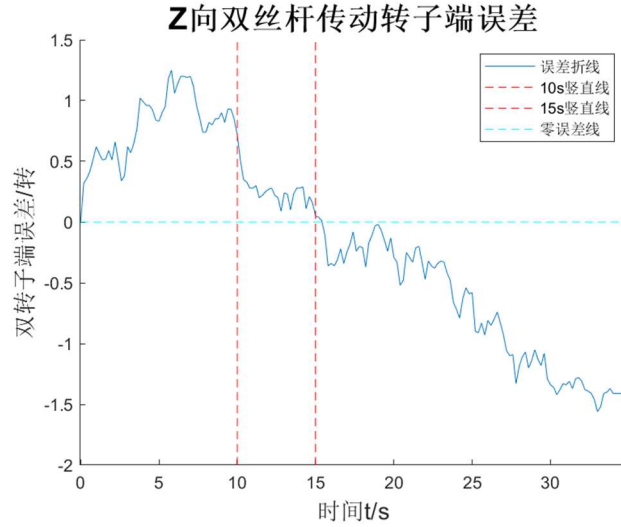
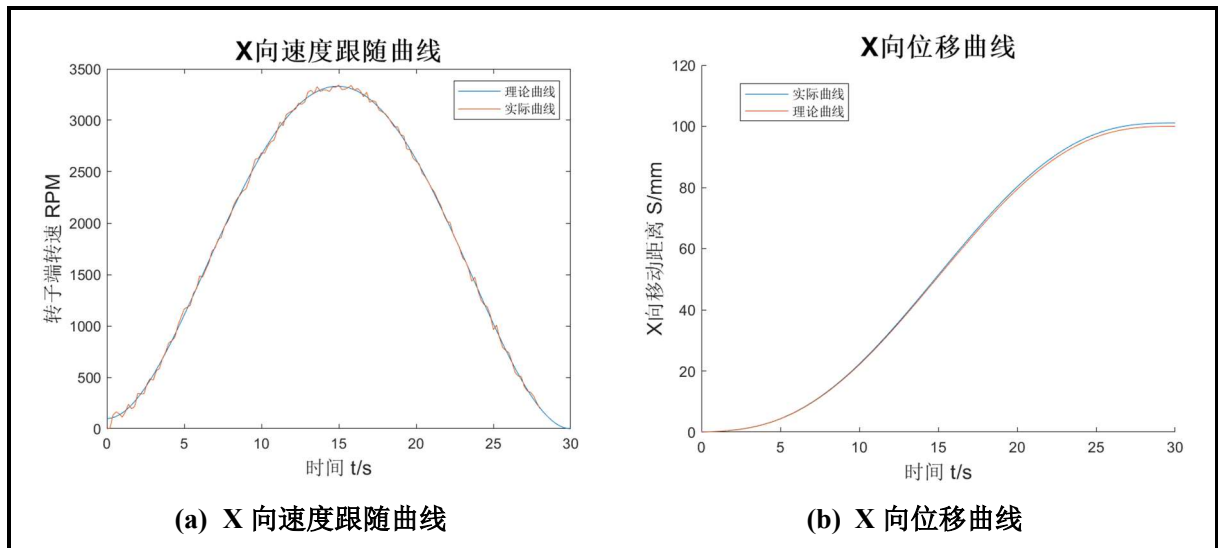


图 24 Z 轴双丝杆同步传动电机转子端运动量误差

由上图可得，最大误差量为 1.5 转，考虑 M2006 直流无刷减速电机减速比 36: 1，以及 Z 向丝杆节距  $P_z=5\text{mm}$ ，即有 Z 向同步传动位移误差最大值  $D_{\text{error,max}}=0.2\text{mm}$ 。该误差量不会对机械结构造成损伤。同时注意到，得益于位置环控制对速度曲线跟随后位置误差的修正，停留期间（10s~15s）转子端之间的误差得到了修正。

对于平面定位精度验证，考虑提取 X、Z 向运行过程中的速度跟随数据以及位移数据。指定 X、Z 向测试方法为 30s 移动 100mm。提取相应数据并作图如下（采样频率 5Hz）：





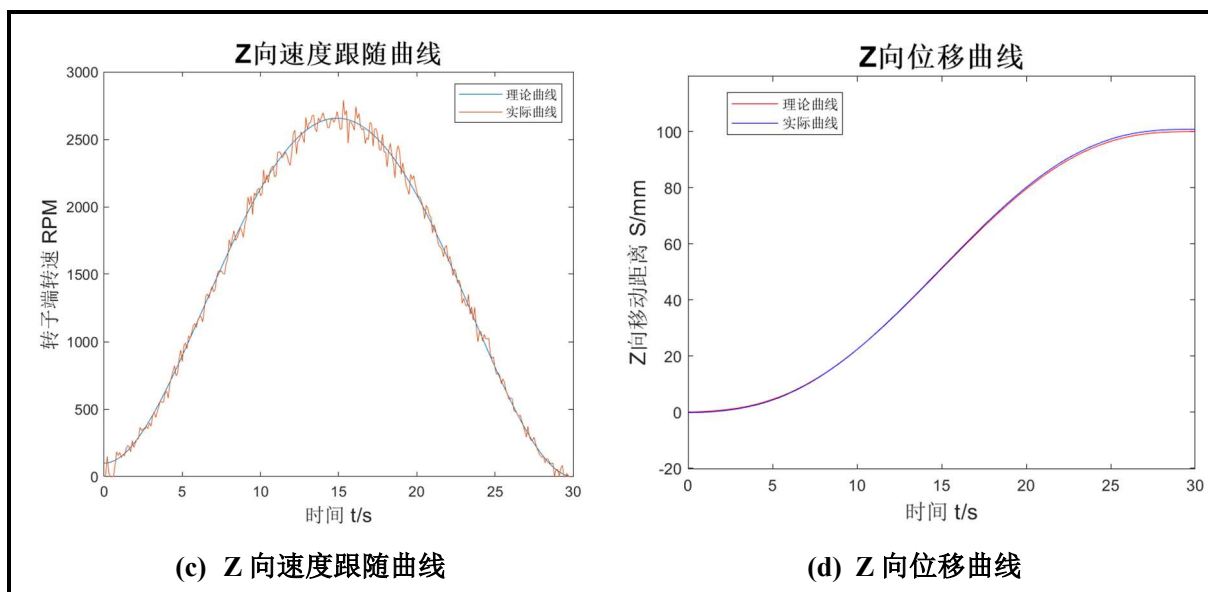


图 25 X、Z 向定位精度验证

由上图可得,X、Z 向跟随情况良好,其中 X 向理论位移 100mm,实际位移 101.01mm,误差  $D_x=1.01\text{mm}$ ; Z 向理论位移 100mm,实际位移 101mm,误差  $D_z=1\text{mm}$ 。

经多次实验验证, X、Z 向定位精度均能满足业务需求。

#### 4.2.2 提取业务测试

取货业务测试用于验证齿轮齿条机构对抽屉盒提取操作的精准度。

考虑提取齿轮齿条运行过程中电机速度跟随数据以及位移数据。指定测试流程为向后移动 150mm, 停留 2.5 秒后向前移动 150mm。提取相应数据并做图如下(采样频率 10Hz):

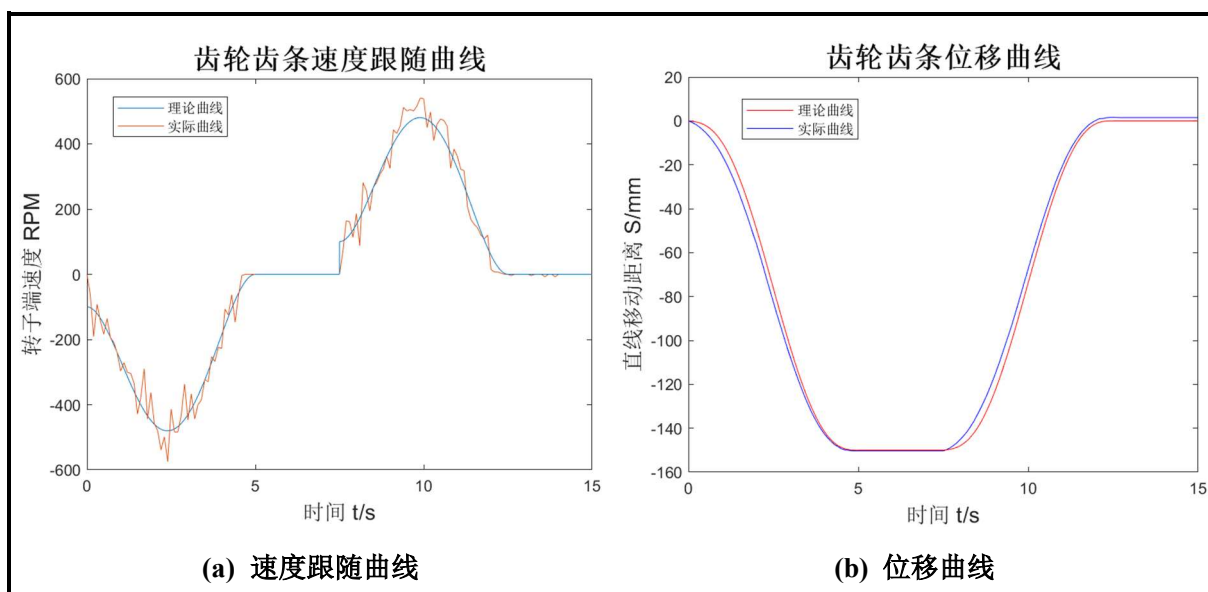


图 26 齿轮齿条精度验证

由上图可得, 齿轮齿条运动单元在单次往返测试中, 理论位移均为 150mm, 实际位

移分别为 150.3mm 和 151.8mm，误差最大值  $\max\{D_1, D_2\}=1.8\text{mm}$ 。

经多次往复测试验证，齿轮齿条直线运动单元精度能满足业务要求。

#### 4.2.3 入锅业务测试

入锅业务测试用于验证食材投放精准度。

考虑通过物品放置并投送的实验验证准确度。有某一测试过程测试图像如下：

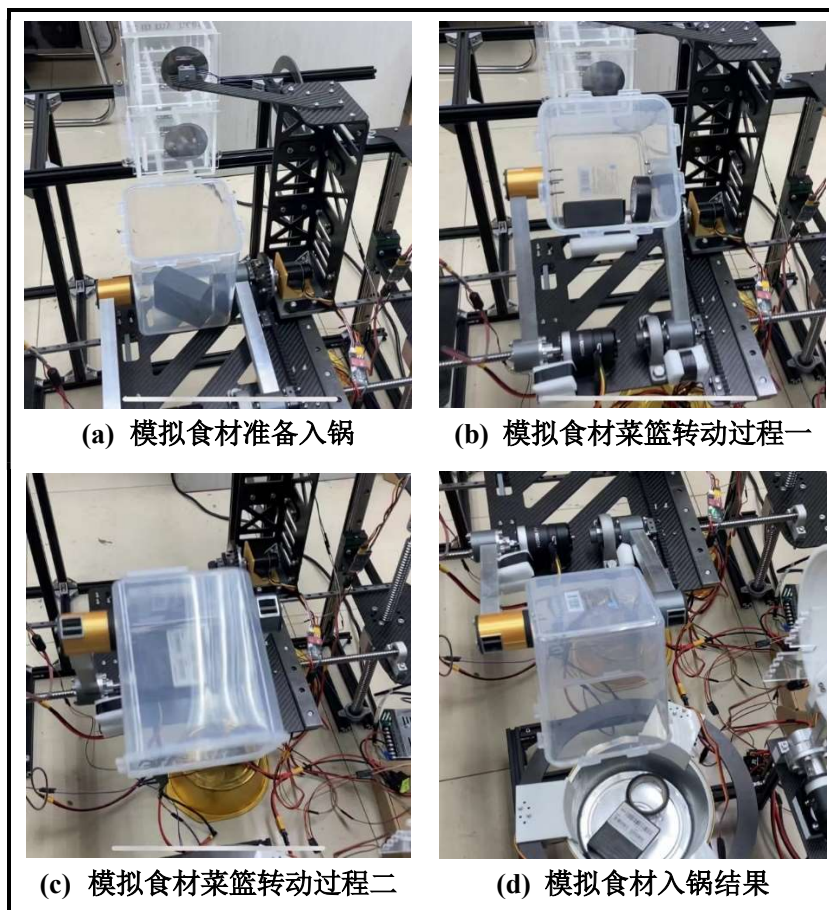


图 27 模拟食材入锅准确度验证

经多次实验验证，模拟食材入锅效果良好，均被准确投送入锅。

#### 4.2.4 烹饪业务测试

烹饪业务测试用于验证锅盖转动角度准确性以及铲勺翻炒情况。

对于锅盖转动角度准确性验证，指定测试流程为正转 90 度，停留 9s 后反转 90 度。

提取相应测试数据并作图如下（采样频率 10Hz）：

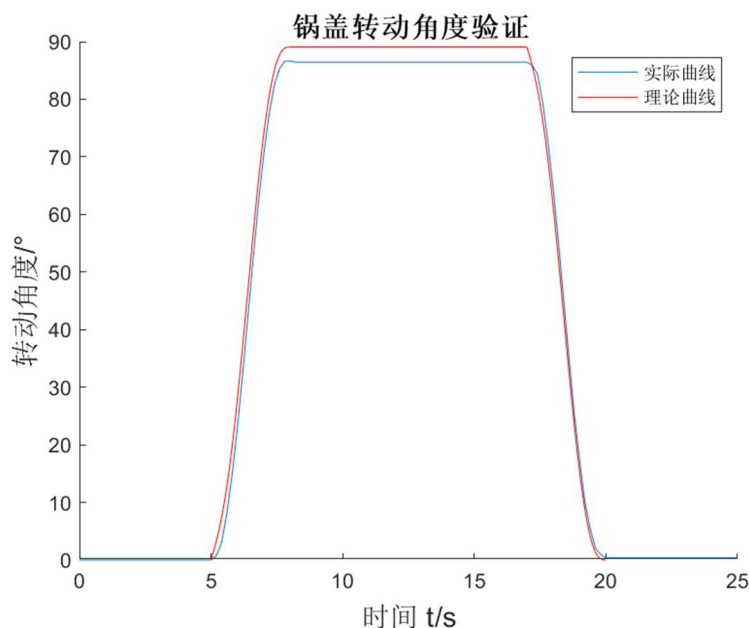


图 28 锅盖转动准确度测试

由上图可得，曲线跟随情况良好，转动至末端误差角度  $\beta=90-86.44=3.56^\circ$ 。

对于铲勺翻炒情况，鉴于目前未对实际菜品进行烹饪，暂无法进行验证。

#### 4.2.5 出餐业务测试

出餐业务测试用于验证抬升丝杆运动精度以及一体化云台转动精度。

对于抬升丝杆运动精度，考虑提取速度跟随数据以及位移数据。指定测试内容为 20 秒抬升 10cm。提取测试数据并做图如下（采样频率 10Hz）：

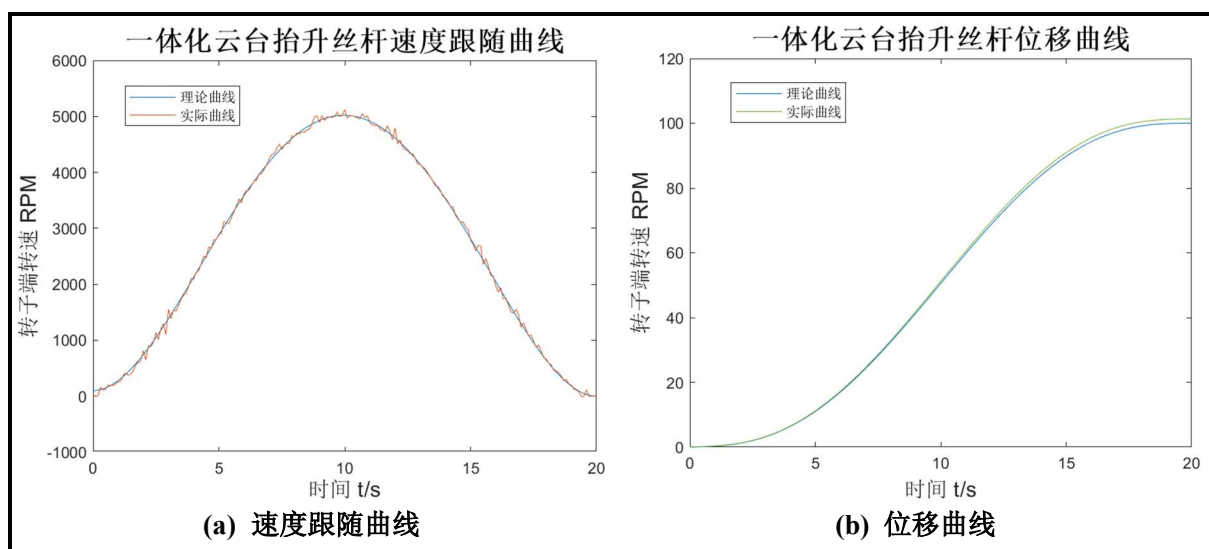


图 29 一体化云台抬升丝杆精度测试

由上图可得，抬升丝杆跟随情况良好。本次测试中，抬升丝杆理论位移为 100mm 时，有实际位移 101.3mm，误差  $D=1.3\text{mm}$ ，其精度满足业务需求。

对于一体化云台转动精度，考虑提取位移数据。指定测试内容为往复转动 90 度，转动间隔为 10s。提取位移数据并作图如下（采样频率 5Hz）：

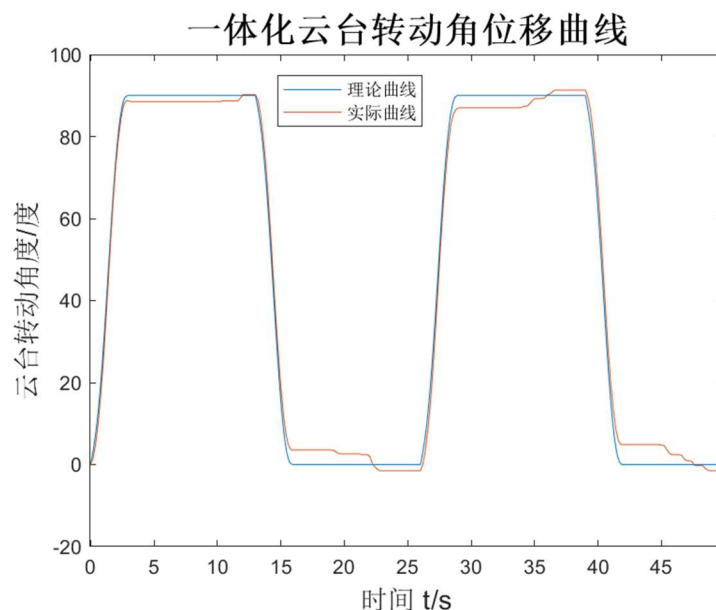


图 30 一体化云台转动角位移曲线

由上图，一体化云台在两个往返测试中，理论转动角度均为 90 度时，有速度曲线跟随后角度误差数据见下表第一列，以及 10s 模拟待机状态经位置环自修正后的角度误差数据见下表第二列。

表 5 一体化云台转动角位移精度测试

速度曲线跟随后误差	经位置环修正后误差
1.31°	0.19°
3.563°	-1.5°
3°	1.31°
4.875°	-1.5°

上表数据不单说明一体化云台转动精度满足业务需求，更是对本项目工程位置控制框架高精度特性的成功验证。

## 结论

本文介绍了一种可实现食品存储烹饪一体化操作的智能售货机，通过模型设计，嵌入式控制代码编写，实物搭建并测试，验证了该产品对于食品存储烹饪一体化操作流程的正确性。该产品弥补了售货机市场在食品存储烹饪方面应用的空缺，为办公人士及时就餐提供了一种新选择。该产品尺寸较小，成本较低，传动方式简单，传动精度较高，

控制任务计算量较小，自带实时操作系统。将来可投放于办公楼、商场以及教学楼，具有较大潜在商业价值。

## 参考文献

- [1]. 石海娥.自动售货机“老树发新芽”[J].光彩,2016(02):40-41.
- [2]. 吴酉芝,李保国,丁峨峰,等.全自动食品制售机及其研究进展[J].食品工业,2018,39(2):281-285.
- [3]. 邢斌,吴庆梅,宋原,郭磊.一种自动烹饪机器人的设计与实现[J].机电产品开发与创新,2016,29(01):76-77+85.
- [4]. 包哲强.自动烹饪机器人投料系统设计[J].机械与电子,2009(04):59-62.