



揚州大學

# 本科生毕业设计

毕业设计题目 基于云台控制的模拟电磁曲射炮设计

学生姓名/学号 张伟 160901137

所在学院 信息工程学院

专业及班级 电科1601

指导教师 陈磊

完成日期 2020年5月23日

## 摘要

当前国际形势变化莫测，新概念武器已成为现代军事领域各国角力的关键力量，而模拟电磁曲射炮就是这一时期出现的一种产物。本文提出一种基于云台控制的模拟电磁曲射炮设计，主要研究电磁曲射炮的动力系统、二自由度云台设计和单目测距算法三个关键点。电压升高至 120V 对超级电容充电，STM32 单片机控制触发可控硅关断充电，电容对磁感线圈瞬间放电产生磁场，弹丸在磁场中受洛伦磁力作用而射出。为控制弹丸精确打击目标，本设计将炮管和 OpenMV 摄像头架在云台上，摄像头检测目标并测出与目标靶的距离，云台在 PWM 信号控制下转动一定仰角和偏向角。

经实际测试，本设计所有操作能够在 3.6s 内精确射击 9 环，较同类模拟电磁曲射炮有更优的性能。此外，因硬件电路上留有蓝牙和 OLED 显示接口，系统具有良好的可扩展性。

**关键词：**电磁炮，STM32，云台，PID，单目测距

### **Abstract**

Since the current international situation is so full of rapid changes as to be unpredictable, new concept weapons have been playing an increasingly critical role in the wrestling of countries in the modern military field. To be concerned, simulated electromagnetic curved guns is one of products of this period. A design of a simulated electromagnetic curved gun based on gimbal control is presented in this paper, which mainly studies three key points of the dynamic system of the electromagnetic curved gun, 2DOF(two-degree-of-freedom) gimbal design and monocular ranging algorithm. The voltage is raised to 120V to charge the supercapacitor, and then STM32 triggers the thyristor to stop charging, and the supercapacitor instantly discharges the magnetic induction coil to generate a magnetic field. Finally, the projectile is ejected by *Lorentz force* in the magnetic field. In order to control the projectile to accurately strike the target, the design puts the barrel and OpenMV camera on the gimbal. The camera detects the target and measures the distance from the target. The gimbal rotates under a certain elevation and deflection angle under the control of the PWM signal from STM32.

After actual testing, all operations of this design can accurately shoot 9 rings in 3.6s, which has better performance than similar ones. In addition, because of the Bluetooth and OLED display interfaces left on the hardware circuit, the system has good scalability.

**Keyword:** Electromagnetic curved guns; STM32; 2DOF gimbal; PID; monocular ranging algorithm

## 目 录

第一章 绪论.....	1
第一节 课题的研究背景与意义.....	1
第二节 国内外研究现状分析.....	1
一、二自由度云台设计.....	1
二、电磁曲射炮.....	2
三、目标位置标定方法.....	3
第三节 本文主要研究内容.....	3
第二章 理论分析与建模.....	5
第一节 引言.....	5
第二节 电磁曲射炮的动力系统分析.....	5
一、电磁炮的原理.....	5
二、电磁炮的动力系统分析.....	5
第三节 弹丸运动的数学模型建立与分析.....	6
一、运动模型建立.....	6
二、运动模型分析.....	6
第四节 二自由度云台控制方法.....	7
一、PWM 技术简介.....	7
二、舵机 PWM 角度控制.....	8
三、PID 控制算法.....	9
第五节 单目测距方法分析.....	9
第六节 本章小结.....	11
第三章 电磁炮的硬件设计与实现.....	13
第一节 引言.....	13
第二节 硬件系统的搭建.....	13
一、系统结构组成及原理.....	13
二、关键器件性能分析.....	13
第三节 硬件电路设计与实现.....	14
一、STM32 最小系统电路.....	14
二、舵机接口电路.....	15
三、电磁炮电路.....	16

---

四、输入\输出设备电路.....	16
五、电源电路.....	17
第四节 核心电路测试与分析.....	17
第五节 本章小结.....	17
第四章 电磁炮的软件设计与实现.....	18
第一节 引言.....	18
第二节 软件设计环境搭建.....	18
一、Keil arm 简介.....	18
二、OpenMV 开发环境搭建.....	18
第三节 系统程序工作流程.....	19
第四节 主要模块程序程序与实现.....	20
一、舵机驱动程序设计.....	20
二、OpenMV 摄像头测距程序设计.....	22
三、输入\输出设备程序设计.....	23
第五节 本章小结.....	25
第五章 设计总结与分析.....	26
第一节 系统测试性能指标.....	26
一、测试方案.....	26
二、测试结果.....	26
第二节 设计成效与分析.....	27
第三节 创新特色总结展望.....	28

## 第一章 绪论

### 第一节 课题的研究背景与意义

近年来涌现出大批新概念武器<sup>[1~2]</sup>，模拟电磁曲射炮就是这一时期的产物，俨然已成为现代军事领域各国角力的关键力量。

本文基于此背景条件，设计一种能检测目标并自动射击的模拟电磁曲射炮（下文无特别说明，均用“电磁炮”代替）。主要研究二自由度云台控制、电磁曲射炮动力系统和单目测距三个关键点，提升各部分的效率、准确度和鲁棒性。本设计因涵盖电磁学、电子测量、智能系统、图像处理、控制算法等诸多技术，需要考虑机械结构的稳定性、各传感器和控制器的选择、电子电路设计及控制算法的软件实现，才能将系统做到精准稳定。

因此，本课题的研究将对新概念武器的研究带来启发性，能促进学生自主创新能力和集成设计能力的提升，很好地响应了国家教育部和工信部对电子信息专业学生的专业学习要求。

### 第二节 国内外研究现状分析

#### 一、二自由度云台设计

二自由度云台通过搭载摄像头可实现二维空间内的目标检测，具有广泛的实际应用。国内外研究者分别对二自由度云台的设计提出了各种创新性的设计，主要分为电力驱动、机械结构的设计与研究，吴松森<sup>[3]</sup>利用局部弯曲振动和摩擦力驱动提出了单定子塔形超声电机。另外，肖杨<sup>[4]</sup>提出了角度环与图像环的双环控制器设计，提高了云台开环控制位姿估算速率。但由于目前绝大多数云台均采用伺服电机，追求转动的精确度而使得云台十分繁重，在很多对便携式、体积要求较高的场景下并不实用。

因此，本文采用一种基于舵机的便携式简易二自由度云台，中心圆盘下方(竖直方向)固定一枚舵机，上方一枚舵机与下方舵机齿轮咬合，硬件结构如下图 1.1 所示。



图 1.1 二自由度云台实物

## 二、电磁曲射炮

电磁炮（电炮）中的线圈炮按照不同的原理，主要分为以下三类：

(1) 感应炮<sup>[12]</sup>其原理和感应式直线电机类似，炮弹带有线圈，炮筒线圈上施加变化电流，两个磁场的相互作用形成推力将弹丸射出。

(2) 磁阻炮<sup>[5]</sup>的弹丸采用导磁率为数千倍  $\mu_0$  的铁磁材料制成，弹丸在经过通电线圈时会使线圈内的磁阻减小，磁场强度增大使弹丸受力增大，向前推进弹丸。

(3) 重接炮<sup>[6]</sup>采用多级线圈逐级加速的方法，形成连续动作的磁场，利用其对弹丸的吸引力向前推进弹丸。

本设计主要讨论单级重接炮。而对于单极重接炮的研究，针对电磁场、动力学、电磁能量转换效率<sup>[7]</sup>、引信优化等又有不同的研究方案。

为解决电磁炮在发射过程中瞬态多物理场的作用机制与内在规律，林庆华和栗保明<sup>[8]</sup>建立了包含电路、电磁场、热场和结构场的数学模型，采用隐式有限元格式求解电磁场和热场以及显式有限元格式求解结构场，利用载荷传递和时间同步实现各物理场之间的耦合，从而发展出一种瞬态多物理场求解器。

从电磁炮的空气动力学研究来看，沈剑、王少龙等<sup>[9]</sup>针对弹丸的不同电阻梯度和弹道的摩擦系数进行研究，得出其对弹丸速度和位移的影响，从而提高了弹丸运动的空气动力学性能；Jian Shen, Shao-bo Fan 等<sup>[10]</sup>通过稳态计算流体动力学（CFD）模拟，分析出电磁炮炮弹流程的基本密度、压力和速度等高线，在通过优化配置得到了用于摆锤分析的粒子弹道计算，其行为比常规空气动力学布局的弹丸更稳定。

### 三、目标位置标定方法

目前可利用超声波、激光等测定距离，下表列出这两种方法的对比分析。

表 1.1 几种测距方法比较

测距方法	原理	精度	最远距离	代表模块
超声波	超声波发射器发射超声波后，遇到物体后返	3.0mm	2cm~400cm	HC-SR04
	回接收器，测出超声波的传播时间 $\Delta T$ 即可获得距离 L			
激光	光速与往返时间乘积的一半，就是距被测物体的长度	0.5mm	0cm~400cm	VL53L1X
			0cm~200cm	GY-53

超声波测距受周围环境（温湿度、干扰物体等）的影响，本设计由于需要考虑复杂环境的适用性，该方法并不合适。激光测距在良好的环境下精度能够达到很高，但由于其测量受外界光线影响较为严重，测量范围不能满足暗光长距离的设计需要。此外，激光测距模块的成本也相对较高。综合考虑下，本文采用 OpenMV 摄像头完成目标检测。

由于采用了带有特定颜色的引导标识，所以本文采用摄像头+图像处理的方法获取目标环形靶的位置，摄像头单目测距确定定标点与环形靶的距离，架设摄像头的二维云台转动识别环形靶而得出偏离角度。具体目标检测和测距原理将在理论分析章节详述。

### 第三节 本文主要研究内容

在距离定点 200-300cm，与中心轴线偏移角度为 $\pm 30^\circ$ 的扇环内，放置目标环形靶，基于云台设计模拟电磁曲射炮，实现对目标范围内任意位置靶子的精确打击。

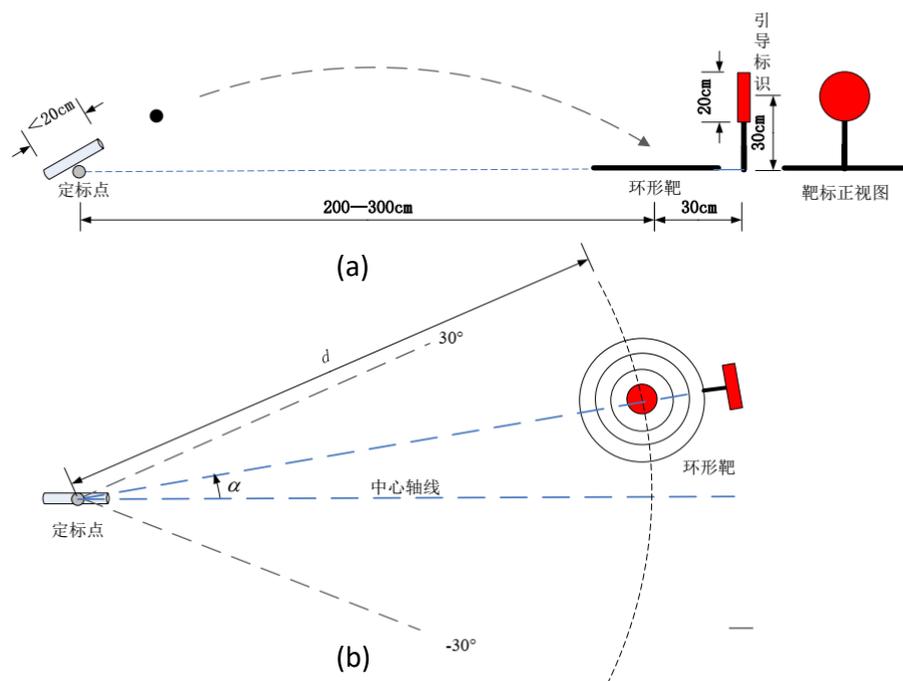


图 1.2 模拟电磁炮设计要求

(1) 基础要求：参照图 1.2，环形靶放置在目标范围内，设定距离值和角度值，启动电磁炮后自动射击环形靶，射中环数和时间效率越高越好。

(2) 扩展要求：完成基础要求后，还应当满足自动控制智能系统的设计要求，可自动搜索、自动射击。同样地，射中环数和时间效率越高越好。

本设计属于新概念智能武器研究领域，特别地属于感应线圈炮的设计与实现。主要关注电磁曲射炮炮管的自动控制方面，精确打击目标，而电磁感应线圈的电磁能量转换效率<sup>[7]</sup>、引信优化等不是本设计着重研究的对象。如何精确识别目标并迅速自动射击这将是主要研究点，本设计采用集成度和识别率均较高的 OpenMV 摄像头，在 Keil-MDK ARM 开发环境下实现优化算法的编程，完成自动精度射击目标。

## 第二章 理论分析与建模

### 第一节 引言

本设计是一个完整的嵌入式综合系统，涉及电磁学、电子测量、智能系统、控制算法等多种技术。因此，本文采用自上而下的设计思路来实现，分别讨论电磁曲射炮动力系统、弹丸运动的数学模型建立、二自由度云台设计与控制算法和单目测距算法四个核心问题。

### 第二节 电磁曲射炮的动力系统分析

#### 一、电磁炮的原理

本设计采用单级重接炮实现电磁炮的发射，感应线圈中产生变化的磁场即可使弹丸加速射出<sup>[11]</sup>。具体原理如下：

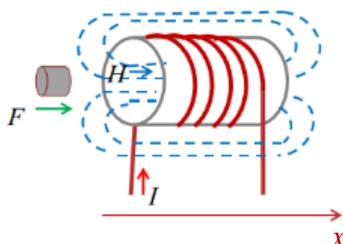


图 2.1 线圈炮的电磁作用力原理

磁性材料（弹丸）磁化后受到的磁场力<sup>[12]</sup>为：

$$F = \int_{V_m} \mu_m M_m \frac{dH}{dx} dv \quad (2.1)$$

其中， $M_m$ 是磁化强度， $H$ 为磁场强度。

弹丸向磁场强度大的方向移动，图 2.1 中向右移动。线圈中心处因其 $\frac{dH}{dx} = 0$ ，故受力为零；过中点后， $\frac{dH}{dx} < 0$ ，故受力方向变反，阻碍前行。

#### 二、电磁炮的动力系统分析

由上述分析，要使得弹丸顺利射出就需要做到以下两点：

- (1) 开始要在线圈上加较大的电流，形成足够大的力使弹丸加速；
- (2) 弹丸到达线圈中点后，应该关断电流，减小反向的阻力。

在此条件下，可以采用高电源电压，控制电压加到线圈上的时间，在弹丸到线圈中点前关断，线圈上的电流经续流二极管释放，来达到目的。但由于关断电源的时机很难控制而不易实现。本文采用电源升压后对超级电容充电至高电压，接通线圈后放电，初始电流大，以后逐步减小，从而使弹丸正程加速快，积累能量大，后半程线圈电流小，阻力导致的能耗小，从而可射出。此外，该方法更安全可靠，能够精准稳定的控制弹丸的射出速度，保证之后弹丸的动力学分析更准确。

### 第三节 弹丸运动的数学模型建立与分析

#### 一、运动模型建立

弹丸受电磁力射出炮管后做斜抛运动，如图 2.2 所示。

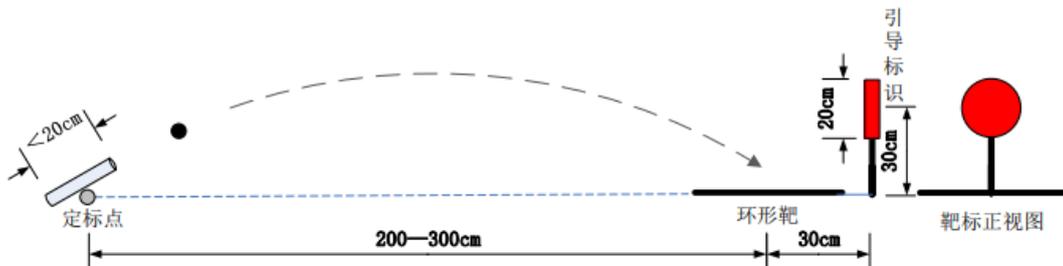


图 2.2 电磁炮弹丸运动示意

以定标点为原点，中心轴由定标点向环形靶的方向为 X 轴方向，电磁炮所在竖直向上方向为 Y 轴建立弹丸斜抛运动数学模型，如图 2.3 所示。

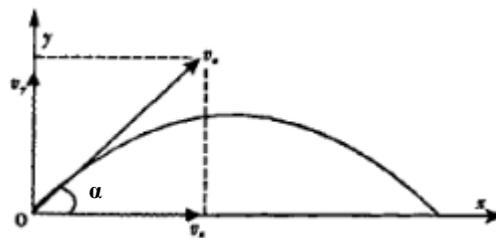


图 2.3 斜抛运动数学模型示意图

#### 二、运动模型分析

在如图 2.3 所示的弹丸斜抛运动的数学模型中，数学分析如下：

$$\begin{cases} v_x = v_0 \cos \alpha \\ v_y = v_0 \sin \alpha - gt \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\begin{cases} x = v_0 \cos \alpha \cdot t \\ y = v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad (2.3)$$

其中，运动时间  $t = 2v_0 \sin \alpha / g$  (2.4)

Matlab 运动轨迹模拟，仿真图像如下图 2.4 所示。可以得出，弹丸的弹着点主要与初速度和仰角有关，而初速度由弹丸在磁场中的受力（即加速度）确定，接下来会在本章总结中确定其间的关系。

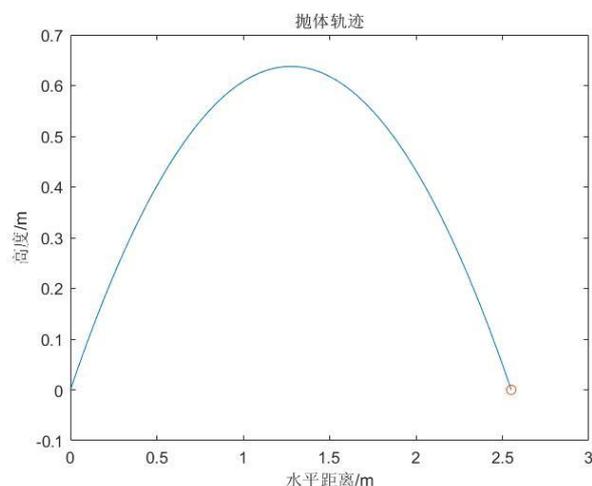


图 2.4 斜抛运动仿真结果

## 第四节 二自由度云台控制方法

### 一、PWM 技术简介

脉冲宽度调制 PWM 是一种简单有效的模数控制技术，在测量、通信、功率控制与变换等领域有着广泛应用。

如下图所示，在固定的时间周期  $T$  内， $t_1$  时间长度内接通脉冲信号、 $t_2$  时间内关断输出，从而控制电枢电压的占空比来改变负载上的平均电压，电枢电压的占空比与平均电压有如下关系。

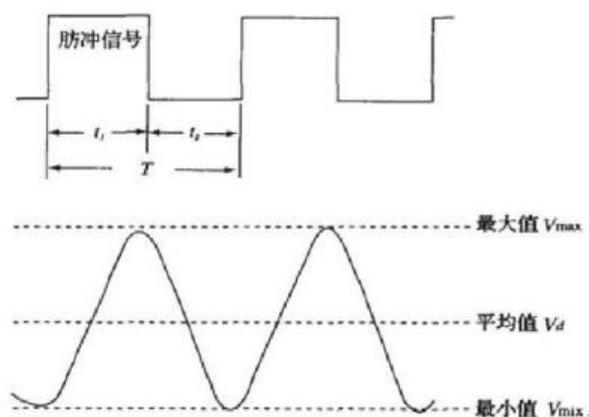


图 2.5 电枢电压占空比与平均电压的关系

$$V_d = V_{max} * D \quad (2.5)$$

其中， $V_d$ 是电机的平均速度， $V_{max}$ 是电机全通电时的最大速度， $D$ 是电枢电压的占空比，且 $D = \frac{t1}{T}$ 。在此原理下，舵机的转动角度可由单片机输出不同的 PWM 来控制。

## 二、舵机 PWM 角度控制

舵机（Servo）是一套完备的自动控制系统，舵机使用前需要调零点，也就是舵机的中性位置。舵机的三根信号线如下图 2.6 所示。



图 2.6 舵机的三个端口

通过信号线发送一定占空比的 PWM 脉冲确定旋转轴的位置。舵机控制的最大脉冲宽度为 20 毫秒，脉冲宽度将决定舵机转轴的角度，脉冲宽度与旋转角度的关系如下图 2.7 所示。

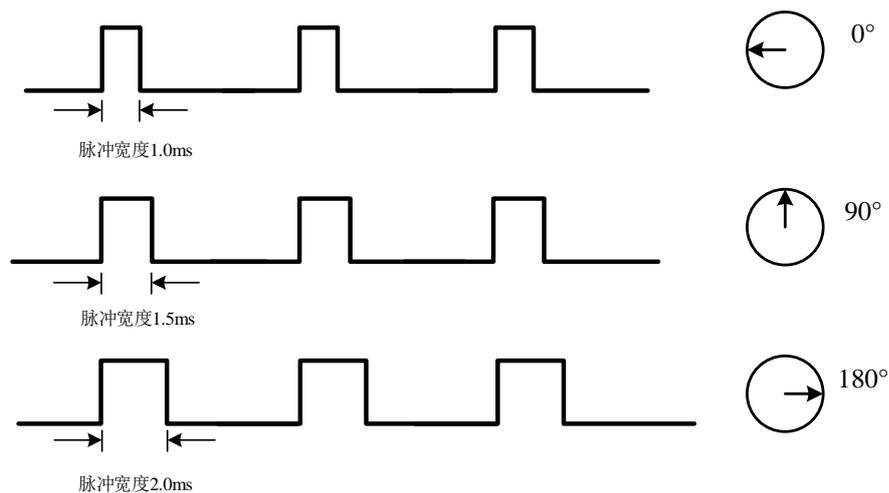


图 2.7 脉冲宽度与旋转角度的关系

在本设计中，舵机的供电可由单片机最小系统 STM32 的 VCC 提供，单片机通过信号线输出 PWM 波，控制转动需要的角度。具体实现方法将在第四章软件设计中详细给出。

### 三、PID 控制算法

为了使舵机更快更准地转动一定角度，本设计采用 PID 控制算法，其原理如下框图所示。

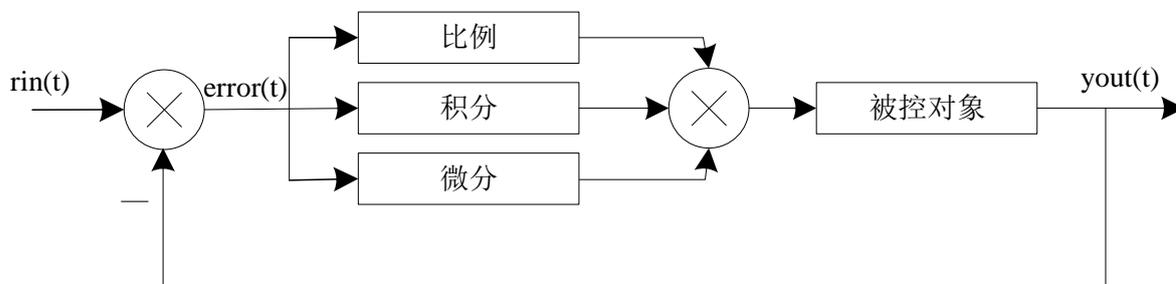


图 2.8 PID 控制系统原理框图

PID 控制规律为：

$$u(t) = k_p(error(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t error(t)dt + \frac{T_D derror(t)}{dt}) \quad (2.6)$$

其中，

$$error(t) = rin(t) - yout(t) \quad (2.7)$$

或写成传递函数的形式：

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p(1 + \frac{1}{T_I} + T_D s) \quad (2.8)$$

式中， $k_p$  是比例系数， $T_I$  是积分时间常数， $T_D$  是微分时间常数。

### 第五节 单目测距方法分析

本文目标测距是在目标形状已知的前提下，以图像处理为基础，利用小孔成像原理<sup>[13]</sup>，建立图像特征点与距离的关系，并分三个阶段实现。

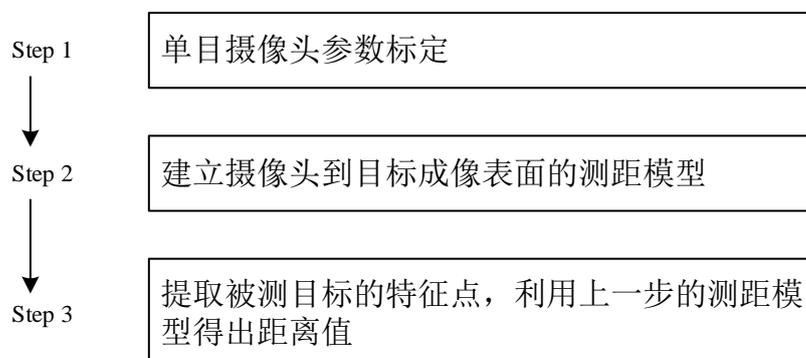


图 2.9 单目测距实现步骤

首先，由于本文采用的摄像头非广角镜头，在摄像机标定阶段，可以忽略摄像头的畸变对测距造成的误差，同时实现单目摄像头内参数的标定。

其次，利用小孔成像原理，确定成像尺寸与实物尺寸的计算式(即映射关系)，建立如下测距模型。

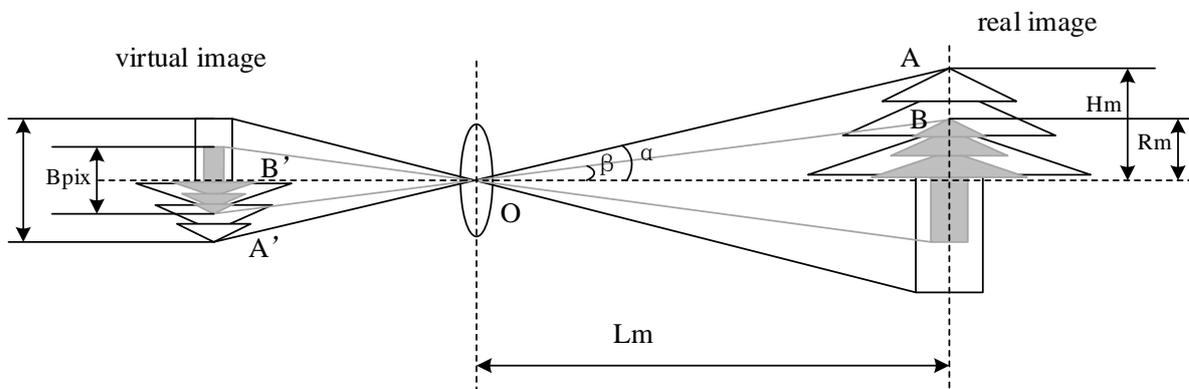


图 2.10 摄像头成像与实物的映射关系

如图 2.10 所示，两次实物成像的映射关系分别用浅色和深色来标注。其中，被测目标与摄像头的距离为  $L_m$ ，标定摄像头参数时的物体高度和被测目标的高度、仰角、成像像素值分别用  $H_m$ 、 $\alpha$ 、 $A_{pix}$ 、 $R_m$ 、 $\beta$ 、 $B_{pix}$  表示。通过相似三角形原理，可以得出：

$$\begin{aligned}\tan \alpha &= \frac{A_{pix}}{2L} \\ \tan \beta &= \frac{B_{pix}}{2L}\end{aligned}\quad (2.9)$$

由(2.9)式得，

$$\frac{\tan \alpha}{\tan \beta} = \frac{A_{pix}}{B_{pix}}\quad (2.10)$$

在实物几何关系中，可得到目标距离  $L_m$  与被测目标高度  $R_m$  的三角函数式：

$$\tan \beta = \frac{R_m}{L_m}\quad (2.11)$$

将(2.11)式带入(2.10)式可得出：

$$L_m * B_{pix} = \frac{R_m * A_{pix}}{\tan \alpha}\quad (2.12)$$

在测距前，设定摄像头的内部参数  $k = \frac{R_m * A_{pix}}{\tan \alpha}$  为一个常数，那么实际的距离就是一个固定的等式：

$$L_m = \frac{k}{B_{pix}}\quad (2.13)$$

最后，在测距阶段，提取摄像头内目标的成像像素值，根据（2.13）式即可计算出摄像头到目标的实际距离。

## 第六节 本章小结

模拟电磁曲射炮主要控制弹丸射击的距离、角度和速度。本章建立弹丸射出后的斜抛运动数学模型，分析出其影响因素，随后分析电磁炮动力系统原理，为弹丸提供足够的动力，即初速度；二自由度云台控制弹丸射出的角度和距离；OpenMV 单目测距确定射击目标距离。算法方面主要涉及二自由度舵机云台的 PWM 控制、PID 算法和单目测距算法。

根据本章对电磁炮动力系统、弹丸运动数学模型和二自由度云台 PWM 调节的分析，现对整个系统理论分析做总结，找出弹丸射程与云台仰角和 PWM 参数设定值之间的关系。

忽略空气阻力和炮管内壁的摩擦阻力，忽略弹丸距离地面的初始高度，炮管内部运动近似看作斜抛运动的一部分。

(1)弹丸在磁场中加速阶段：弹丸射出的动能来自于磁场的加速，即

$$E_{动} = \frac{1}{2} * m * v_0^2 \quad (2.14)$$

式中， $m$  为弹丸的质量， $v_0$  为弹丸的初速度。而弹丸在磁感线圈中获得的势能为：

$$E_{势} = F * \frac{l}{2} \quad (2.15)$$

(2)弹丸射出后做斜抛运动阶段：

由(2.1)、(2.3)、(2.4)式，且 $H = \frac{IN}{l}$ ，得：

$$\alpha = \arcsin \frac{mgd}{2M_m V_m IN} \quad (2.16)$$

记 $q = \frac{mg}{2M_m V_m IN}$ ，故仰角转化为角度( $^\circ$ )为：

$$\alpha = \frac{180}{\pi} \arcsin q * d \quad (2.17)$$

本表达式就是仰角  $\alpha$  与射程  $d$  的关系式，也是计算式。

现在对以上表达式中的字母作说明， $V_m$  为弹丸的体积， $N$  为磁感线圈的匝数， $I$  为线圈中的电流， $l$  为缠绕线圈的高度， $g$  为重力加速度， $d$  为射程。特别地，本设计所采用的弹丸是由钢铁混材制成的圆柱体，直径为 3.2mm，高度为 12mm，密度  $\rho_m$  为

$7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，质量约为  $3.0304 \text{ g}$ ；磁感线圈采用的是铜线，线径  $0.62 \text{ mm}$ ，电阻率  $\rho$  为  $0.0185 \Omega \cdot \text{m}^2/\text{m}$ ，缠绕 30 圈、7 层，其电阻  $R = \frac{\rho L}{S} = 0.1295 \Omega$ ，故线圈中的电流  $I = \frac{U}{R} = 926.6409 \text{ A}$ 。

输入角度与输出 PWM 控制信号可以满足这样的关系：

$$\text{PWMCCAP} = 1500 + \text{AngleInput} * 500 / 90; \quad (2.18)$$

本公式将在第四章进行详细介绍。

最终，可以得出弹丸射程与云台仰角和 PWM 参数设定值之间的关系为：

$$\begin{cases} \alpha = \frac{180}{\pi} \arcsin q * d \\ \text{PWMCCAP} = 1500 + \alpha * 500 / 90 \end{cases} \quad (2.19)$$

实验测试后，得出如下图所示的关系：

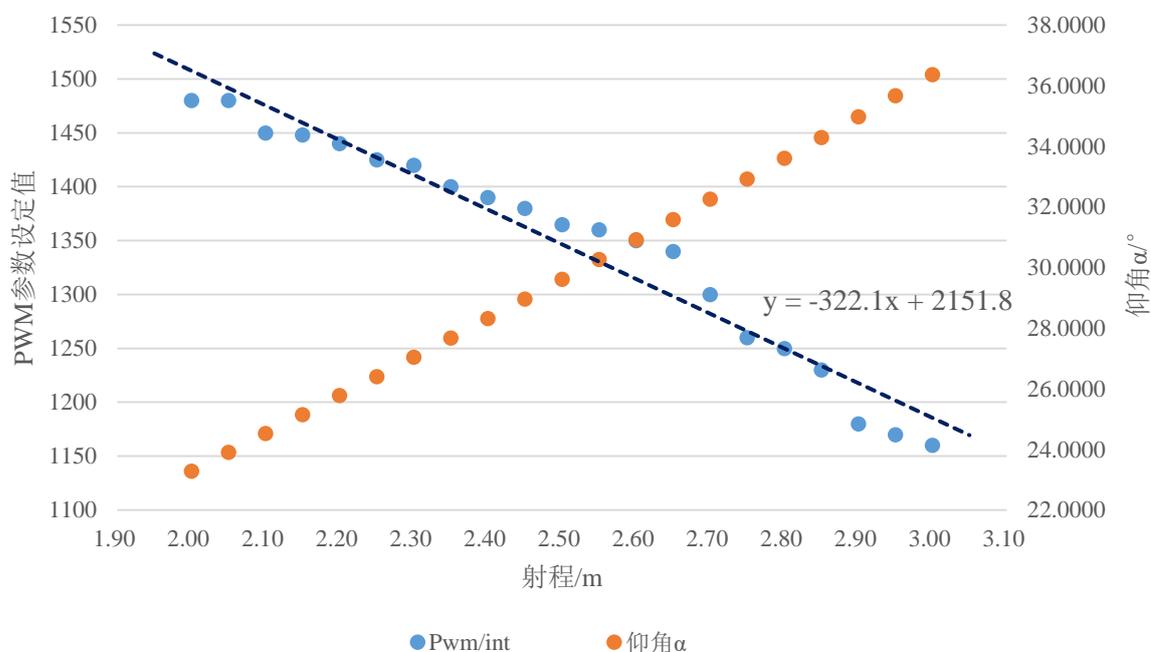


图 2.11 射程与云台仰角、PWM 参数设置之间的关系

由于空气阻力、炮管内壁的摩擦阻力和弹丸距离地面的初始高度等的影响，实验测试的结果与理论分析有些许误差，但影响在可接受的范围内。其中，PWM 参数设定值与射程之间的线性拟合函数为

$$\text{PWMCCAP} = -322.1d + 2151.8 \quad (2.20)$$

## 第三章 电磁炮的硬件设计与实现

### 第一节 引言

针对第二章节的理论建模与分析结果，需要解决电磁炮发射、支持摄像头和/或电磁炮炮管二维空间转动的平台、可人机交互的问题。因此该系统的硬件设计主要包括电磁炮发射装置、二自由度云台、摄像头和输入输出设备，分别对应解决上述问题。核心电路主要由电磁炮电路和控制连接电路组成，而控制连接电路主要是舵机接口电路、输入/输出设备电路。

### 第二节 硬件系统的搭建

#### 一、系统结构组成及原理

电磁曲射炮主要由核心控制器、二自由度云台、电磁炮电路和 OpenMV 摄像头四大部分组成。核心控制器 STM32F103RCT6 根据 OpenMV 摄像头测得的环形靶位置（距离和角度），控制架在二自由度云台上的炮管转动一定水平夹角  $\theta$  和仰角  $\alpha$ ；通过触发可控硅，使超级电容对磁感线圈瞬间放电，线圈内产生磁场，弹丸在磁场中受洛伦兹力的作用射出。如下图 3.1 是本设计的系统结构框图。

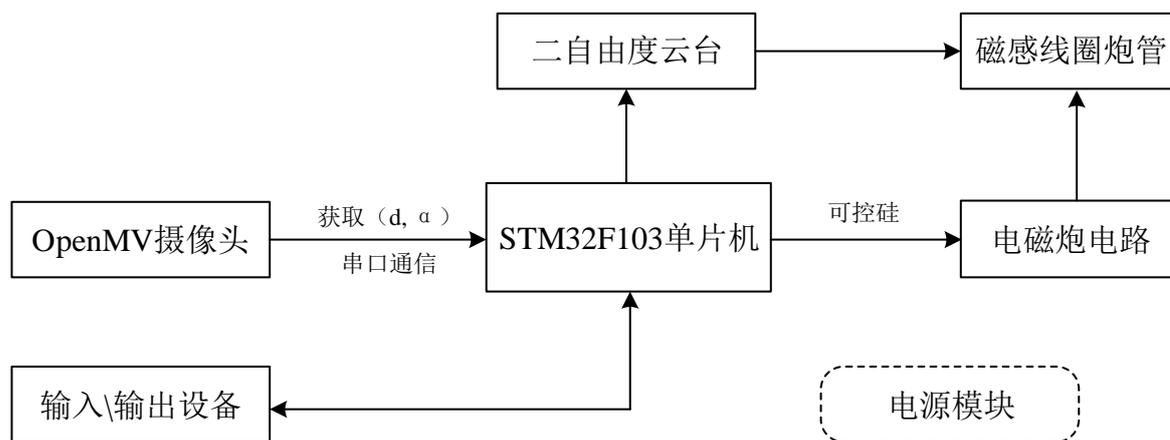


图 3.1 系统结构框图

#### 二、关键器件性能分析

核心控制器：STM32F103RCT6：主频 72MHz，能够快速对信息进行处理，进行 PID 调节。

OpenMV 摄像头：处理器 STM32H7，主频：400MHz，RAM:1MB，

FLASH:2MB，可拆卸感光元件，更换原件方便，性能翻倍，帧率更高，能够快速处理摄像头拍摄的信息并传送。

MG996R 舵机：净重 55g，反应速度 0.18sec/60degree，拉力 11kg/cm。

450V/1500uF 高压储能电容，70TPS12 可控硅，ZVS-MID 升压模块。

### 第三节 硬件电路设计与实现

#### 一、STM32 最小系统电路

本设计中的 STM32 最小系统电路原理图如下图 3.2 所示，各组成部分的电路构成如下。

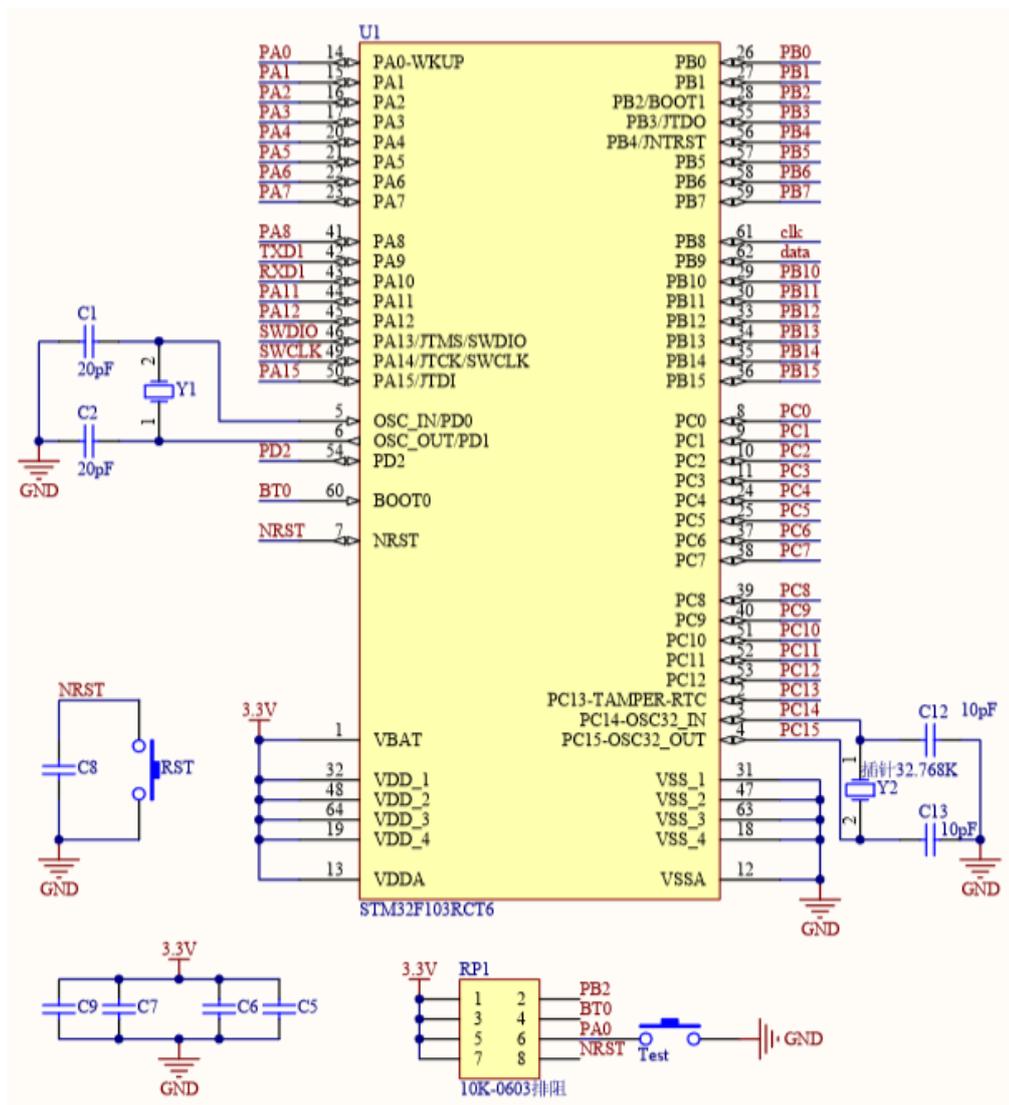


图 3.2 STM32F103 最小系统电路原理图

复位电路：本设计中最小系统电路的复位有按键复位和上电复位两种方式。

STM32 单片机为高电平复位，两种电路从根本上都是给复位引脚上提供一个持续稳定

的高电平。两种复位方式实现如下图 3.3 所示。

复位方式	电路原理图	组成原理
上电复位		<p>在复位引脚上串接一个10uF电容和一个10K电阻，单片机上电时由于RC充放电回路为复位提供足够时间的高电平，随后降低至低电平进入正常工作模式</p>
按键复位		<p>开关和复位电容串联后一端接入复位引脚、一端接地，当开关按下时电容放电，复位引脚被拉高</p>

图 3.3 单片机的两种复位方式

振荡电路：具体电路原理图如下所示，在 OSC\_IN 和 OSC\_OUT 端口串接一个晶振和两个电容即可。

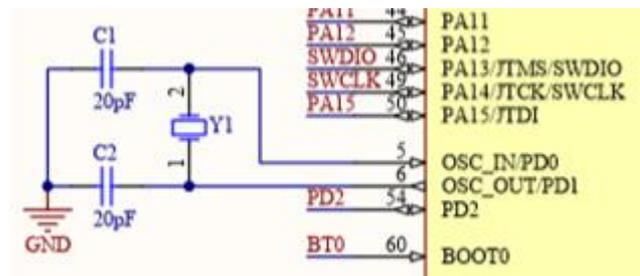


图 3.4 振荡电路原理图

电源电路：由于本设计共用一块电路底板，需要考虑舵机驱动、电磁炮线圈两端电压、单片机逻辑电压等问题，电源供电模块本章会单独列出做详细说明。

## 二、舵机接口电路

根据选用的 MG996R 舵机，需要设计接口电路以满足二自由度云台的需要。舵机接口原理图如下图 3.5 所示，包含电源正极、地线和信号线/控制线 Steering。

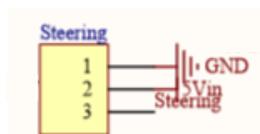


图 3.5 舵机接口电路原理图

### 三、电磁炮电路

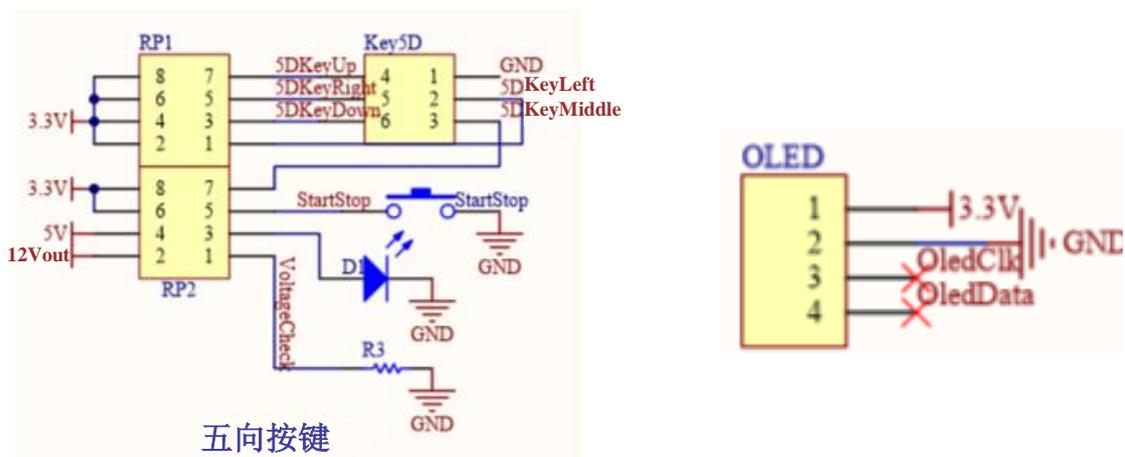
电磁炮电路的组成和连接实物如下图 3.6 所示。电路中由航模锂电池 12V 或直流稳压电源通过升压模块提高至 120V 高电压，并给高压储能电容充电，通过触发可控硅使电容对磁感线圈瞬间放电，产生磁力将弹丸射出。续流二极管加在超级电容两端，起到保护电路的作用。



图 3.6 电磁炮连接实物图

### 四、输入\输出设备电路

本设计需要实现参数输入和结果输出的简单人机交互操作，通过五向键盘输入程序运行的模式选择、目标靶距离标定点的距离和角度、启动发射和结束发射的控制命令，通过 OLED 显示具体的参数调节，提供一个用户操作界面。具体电路原理图如下图 3.7 所示。



(a) 五向按键电路

(b) OLED 接口电路

图 3.7 输入输出设备电路原理图

## 五、电源电路

本设计需要解决舵机驱动电压、电容充电电压、单片机逻辑电压等问题。经综合考虑分析，电源电路通过稳压芯片 AMS1117、12V 转 5V 芯片 LM2842 提供稳定的 12V、5V、3.3V 以满足设计需要，分别用于 ZVS-MID 升压模块、五向按键、单片机逻辑电压、OLED 显示等。

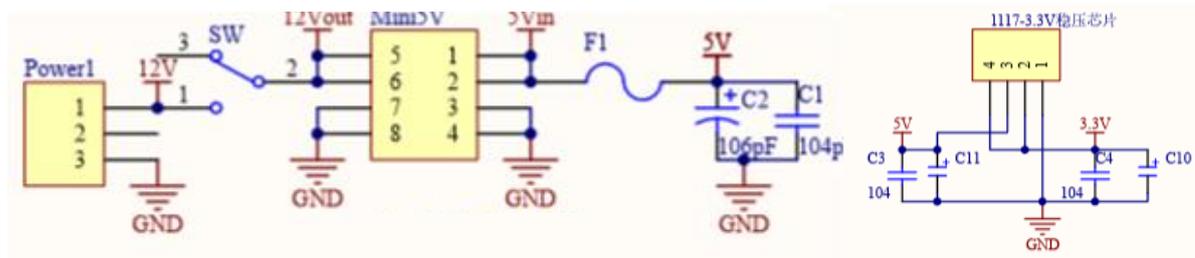


图 3.8 电源电路原理图

## 第四节 核心电路测试与分析

**最小系统电路：**测试 GPIO 端口输出是否正常，定时器/计数器是否正常，电压是否正常（防止短路和虚焊）。

**二自由度舵机云台接口电路：**通过程序给舵机提供不同目标值的 PWM 占空比，调整舵机转动的角度，观察舵机工作是否正常。

**电磁炮电路：**通过测试输入端和输出端电压的大小，控制可控硅能否正常通断，电容能否正常给发射线圈放电。

**输入/输出设备电路：**完成最小系统的测试后，连接五向键盘和 OLED 显示屏，输入键值、输出响应是否正常。

## 第五节 本章小结

硬件结构是一个嵌入式智能系统设计的基础，一切软件设计都是基于硬件设计展开的。本章节给出了稳定的硬件结构，二自由度控制云台，核心电路设计。经实际测试，各项功能模块均能正常工作。

## 第四章 电磁炮的软件设计与实现

### 第一节 引言

一个完整的嵌入式系统需要软硬件协同完成，软件设计部分主要基于各硬件模块作软件开发和调试，最后整合各功能模块实现设计要求。本章节将从软件设计环境搭建开始，详细介绍基于 Keil ARM 和 OpenMV IDE 的系统软件设计。

### 第二节 软件设计环境搭建

#### 一、Keil arm 简介

Keil MDK-Arm (MDK, Microcontroller Development Kit)包含丰富的系统组件（如图 4.1 所示），完美支持基于 Cortex-M 内核的 STM32F103 程序开发。

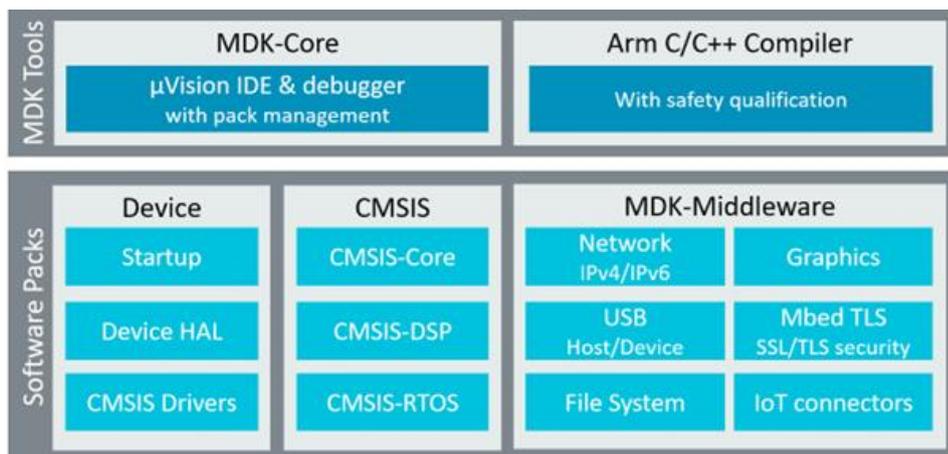


图 4.1 Keil MDK-ARM 组件

Keil ARM 可在不同操作系统下安装使用，简单易操作，移植性也较好。软件安装后，即可进行软件开发。本设计就是在 Windows 10 (64 bites)操作系统下进行，MKD 版本号为 Version 5.30。

#### 二、OpenMV 开发环境搭建

OpenMV 摄像头可以使用 Python 直接在它的集成开发环境下设计开发，程序编辑可自动提示、代码高亮，可在终端直接调试程序，图像显示窗口和图像直方图窗口更方便了对图像处理的操作，在很大程度上提高开发效率。

从它的开发环境搭建来讲，也是十分方便的，只需要安装 IDE 和设备驱动即可，安装过程见下图。因此，本设计就是利用此开发环境完成的，尤其是目标检测部分。



图 4.2 OpenMV 开发环境搭建步骤

### 第三节 系统程序工作流程

本系统由 STM32F103 作为核心控制器。系统上电后，完成系统硬件资源的的初始化，串口、时钟的配置，舵机转轴归零，OLED 显示初始化。然后通过摄像头检测引

导标识并测定距离值，云台水平上转动一定夹角  $\theta$ 、仰角  $\alpha$ ，单片机发送信号触发可控硅释放电容的电压将弹丸射出。程序框架从简单到复杂分为四个操作模式，具体详见程序工作流程图 4.3。

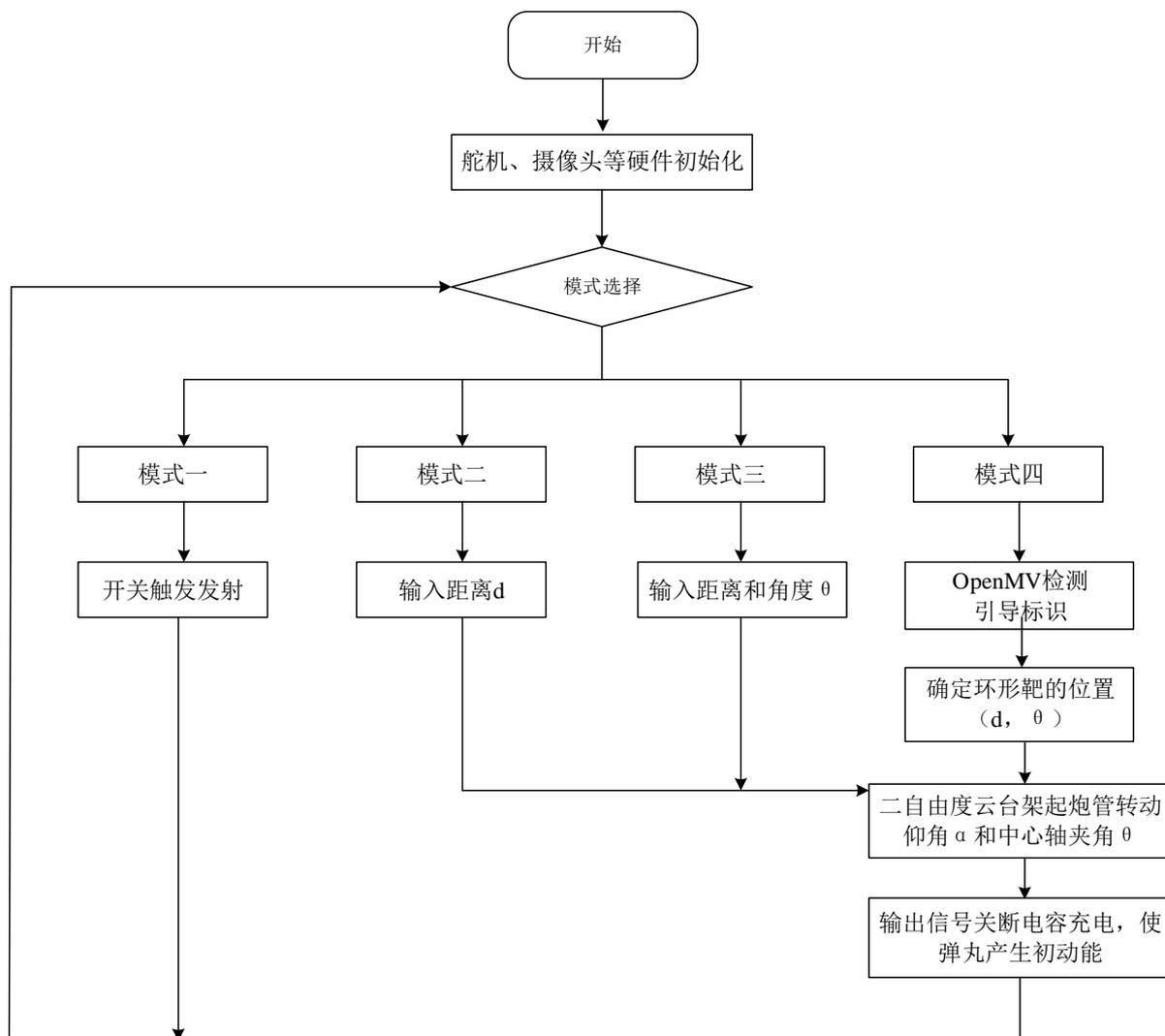


图 4.3 系统程序工作流程图

## 第四节 主要模块程序程序与实现

### 一、舵机驱动程序设计

输入角度与输出 PWM 控制信号可以满足这样的关系：

$$PWMCCAP=1500+Alpha*500/90;$$

其中，PWMCCAP 为单片机寄存器写入值，Alpha 为输入的角度值，即云台的仰角  $\alpha$ 。

关键程序：

```
void Motor_TIM4_PWM(u16 arr,u16 psc)
{
    //RCC ENABLE
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_TIM4,ENABLE);
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_GPIOB,ENABLE);
    //GPIO_Init
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_6|GPIO_Pin_7;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_50MHz;
    GPIO_Init(GPIOB,&GPIO_InitStructure);
    //TIM_Base Init
    TIM_TimeBaseInitTypeDef TIM_TimeBaseStructre;
    TIM_TimeBaseStructre.TIM_Period = arr;
    TIM_TimeBaseStructre.TIM_Prescaler = psc;
    TIM_TimeBaseStructre.TIM_CounterMode = TIM_CounterMode_Up;
    TIM_TimeBaseStructre.TIM_ClockDivision = 0;
    TIM_TimeBaseInit(TIM4,&TIM_TimeBaseStructre);
    //Time_OC Init
    TIM_OCInitTypeDef TIM_OCInitStructure;
    TIM_OCInitStructure.TIM_OCMode = TIM_OCMode_PWM1;
    TIM_OCInitStructure.TIM_OCPolarity = TIM_OCPolarity_High;
    TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = 0;
    TIM_OCInitStructure.TIM_OutputState = TIM_OutputState_Enable;
    TIM_OC1Init(TIM4,&TIM_OCInitStructure);
    TIM_OC2Init(TIM4,&TIM_OCInitStructure);
    //定时器值预装载
    TIM_OC1PreloadConfig(TIM4,TIM_OCPreload_Enable);
    TIM_OC2PreloadConfig(TIM4,TIM_OCPreload_Enable);
}
```

```

TIM_ARRPreloadConfig(TIM4,ENABLE);

//使能

TIM_Cmd(TIM4,ENABLE);

}

void SetPwm(int pwm1,int pwm2)

{

TIM4->CCR1=1583+pwm1;

TIM4->CCR2=1583+pwm2;

}

```

## 二、OpenMV 摄像头测距程序设计

摄像头检测带有红色的引导标识，标出最大目标色块的矩形，算出其像素值 $B_{pix}$ 并发送给 STM32F103，通过第二章中标定的摄像头内部参数 $k = \frac{R_m * A_{pix}}{\tan \alpha}$ ，计算出实际的距离 $L_m = \frac{k}{B_{pix}}$ 。

如下是 OpenMV 摄像头内的程序：

```

#感应区域

ball_threshold = (255,0,0)

#感应区的大小

Board_ROI = (86,26,165,166)

#摄像头初始化

sensor.reset() # Initialize the camera sensor.

sensor.set_pixformat(sensor.RGB565) # use RGB565.

sensor.set_framesize(sensor.QVGA) # use QQVGA for speed.

sensor.skip_frames(time = 2000) # Let new settings take affect.

sensor.set_auto_gain(True) # turn this on.

sensor.set_auto_whitebal(False) # turn this off.

clock = time.clock() # Tracks FPS.

#串口初始化

uart = UART(3,115200)

```

```
#取像素点最大的色块
def Compare_Pixel(blob_a,blob_b):
    temp = blob_a.pixels() - blob_b.pixels()
    if temp == 0:
        return 0;
    elif temp > 0:
        return 1;
    else:
        return -1;
while(True):
    ball_cx = 0xfd
    ball_cy = 0xfd
    Max_Blob = None
    img = sensor.snapshot().lens_corr(1.3)
    blobs = img.find_blobs([ball_threshold],x_stride=5,y_stride=5,area_threshold=6)
    if blobs:
        Max_Blob = blobs[0] #取最大的目标色块，减小误差
        for b in blobs:
            if Compare_Pixel(Max_Blob,b) == -1:
                Max_Blob = b
        img.draw_cross(Max_Blob.cx(),Max_Blob.cy(),(255,0,0))
        ball_cx = Max_Blob.cx()
        ball_cy = Max_Blob.cy()
        Ball_Pos=bytearray([0xC8,0xF2,int(ball_cx),int(ball_cy)])
    uart.write(Ball_Pos) #发送像素值
```

### 三、输入\输出设备程序设计

本设计采用五向键盘作为输入设备，根据第三章硬件电路设计中介绍的原理，通过STM32F103的外部中断检测按键，作为输入控制指令。具体程序实现如下：

```

u8 KEY_Scan(u8 mode)
{
    static u8 key_up=1;//按键按松开标志
    if(mode) key_up=1; //支持连接
    if(key_up&&(UP==0||DOWN==0||LEFT==0||RIGHT==0||MID==0||START==0))
    {
        delay_ms(2);//去抖动
        key_up=0;
        if(UP==0)return UP_PRES;
        else if(DOWN==0)return DOWN_PRES;
        else if(LEFT==0)return LEFT_PRES;
        else if(RIGHT==0)return RIGHT_PRES;
        else if(MID==0)return MID_PRES;
        else if(START==0)return START_PRES;
    }
    else if(UP==1&&DOWN==1&&LEFT==1\
        &&RIGHT==1&&MID==1&&START==1)
        key_up=1;
    return 0;// 无按键按下
}

```

OLED 显示屏作为系统的输出设备，提供一个可视化的操作界面，显示系统运行模式的选择、参数调整结果。软件编写主要涉及以下函数：

```

void OLED_WR_Byte(unsigned dat,unsigned cmd);
void OLED_Display_On(void);
void OLED_Display_Off(void);
void OLED_Init(void);
void OLED_Clear(void);
void OLED_ShowChar(u8 x,u8 y,u8 chr,u8 Char_Size);
void OLED_ShowNum(u8 x,u8 y,u32 num,u8 len,u8 size);

```

```
void OLED_ShowString(u8 x,u8 y, u8 *p,u8 Char_Size);  
void OLED_Set_Pos(unsigned char x, unsigned char y);  
void OLED_ShowCHinese(u8 x,u8 y,u8 no);  
void IIC_Start(void);  
void IIC_Stop(void);  
void Write_IIC_Command(unsigned char IIC_Command);  
void Write_IIC_Data(unsigned char IIC_Data);  
void Write_IIC_Byte(unsigned char IIC_Byte);  
void IIC_Wait_和 Ack(void);  
void OLED_Show_16(unsigned char x,unsigned y,int temp,unsigned char TextSize);  
void OLED_Showfloat(u8 x,u8 y,float Decimal,u8 len1,u8 len2,u8 Char_Size);
```

## 第五节 本章小结

软件设计部分主要编写各硬件功能模块程序，实现相应的功能。此外，通过软件的方法实现 PWM 脉宽调制和单目测距算法。最后，通过编写软件系统主函数，整合所有功能，以达到系统的整体设计要求。这个过程中，良好的编程习惯能提高代码的稳定性和高可用性。经实际测试，软件系统已正常运行，满足设计需要。

## 第五章 设计总结与分析

### 第一节 系统测试性能指标

#### 一、测试方案

本系统测试主要分为基础实现部分和扩展部分，每项需要多次测试，最终结果以打中目标环形靶的环数和所用时间作为评判指标。

在光线温和、背景无红色物体干扰的环境下测试，环形靶的设计如下图 5.1 所示。引导标识和环形靶的设置、电磁炮的放置位置及尺寸参见图 1.2。

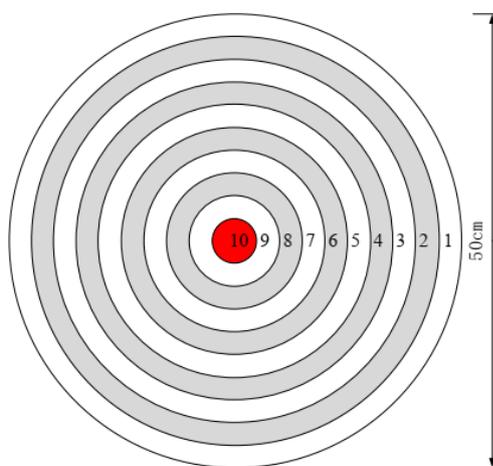


图 5.1 环形靶

#### 基础部分：

参照图 1.2，环形靶放置在目标范围内，设定距离值和角度值，一键启动电磁炮完成自动瞄准射击，记录射击环数和所用时间。

#### 扩展部分：

(1) 完成基础要求后，电磁炮应当能够在指定范围内搜寻引导标识并自动射击环形靶，完成自动控制智能系统的设计要求。同样地，记录射击环数和所用时间。

(2) 进一步地，环形靶放置在指定范围内，启动电磁炮后，在指定  $60^\circ$  扇形范围内做往返搜寻，检测到目标后自动射击，记录击中环形靶的环数和所用时间。

#### 二、测试结果

基础部分：

表 5.1 基础部分测试结果

测试次数	输入距离 d 值/m	输入偏离角度 $\theta/^\circ$	击中环形靶环数/环
1	2.50	30	10
	2.50	45	9
	2.50	60	10
2	2.25	30	9
	2.25	45	9
	2.25	60	9
3	2.00	30	9
	2.00	45	10
	2.00	60	10

扩展部分：

表 5.2 要求 1 测试结果

测试次数	击中环形靶环数/环	总用时/s
1	9	1.76
2	10	1.68
3	9	1.73

表 5.3 要求 2 测试结果

测试次数	是否有停顿	击中环形靶环数/环	总用时/s
1	无	10	3.52
2	无	8	3.43
3	无	9	3.61

## 第二节 设计成效与分析

本设计实现了模拟电磁曲射炮的自动检测目标并精确射击，软件控制二自由度舵机云台转动合适的角度（与中心轴的夹角  $\theta$  和仰角  $\alpha$ ），单目摄像头测出与目标环形靶的准确距离，通过弹丸运动的数学模型和电磁炮动力系统的分析，将弹丸精确设计到目标环形靶。系统的不足之处是难以实现对弹丸初动能的精确控制，由于超级电容每次释放能量存在偶然的不稳定性，弹丸每次放置的初始位置不同、弹丸的形状以及弹丸是否消磁，都会对弹丸的初动能产生影响，造成弹丸落点位置与理论位置出现一定程

度的不符合的现象。

另外，由于考虑系统整体设计的成本和简单的硬件结构，采用 OpenMV 摄像头同时实现检测引导标识和单目测距的功能。但不同光照环境 OpenMV 的识别可能会出现识别结果错误，目标相似干扰物也会影响 OpenMV 的识别等。这些问题都需要在以后的改进和调试过程中解决。

### 第三节 创新特色总结展望

本系统设计的优越性与创新点在于：

- （1）自主设计二自由度云台，相较同类云台具有精度高、小巧便携、控制简单等优势，支持电磁曲射炮更广范围（角度、距离）打击。
- （2）设计具有很强的拓展性，可由软件控制实现炮弹的连发，蓝牙无线控制等。
- （3）采用单片机控制结合五向按键和 OLED 输入以及显示，无需其他控制终端构成一个完成的嵌入式智能系统，并实现结果的可视化。
- （4）目标检测方面采用了 OpenMV 摄像头的解决方案，响应快、精度高，同时简化了系统的机械结构。
- （5）控制算法方面，采用 PID 闭环控制算法，调整炮台对准引导标识，实现追踪射击功能。

当前正逢百年未有之大变局，国际形势复杂多变，各国家及地区在军事领域以新概念武器为首开始各自的研究，电磁炮在其中扮演着十分重要的角色。而对于科学研究和实际应用，一个完整的电磁曲射炮设计需要考虑多种因素，可控的和不可控的，可数字的和不可数字的，本系统在设计时忽略了电磁炮在磁感线圈中的摩擦、电磁引信速率和电磁炮发射点距离地面的高度等因素，弹丸射击精度还有进步的空间，还有待之后的研究中得以提高。

## 致谢

2020 年终将是百世纪最特别的一年，一切都是那么真实而又刻骨铭心。在这一年我也即将毕业，这不光是我一个人的努力。大学期间，最宝贵的幸运就是能够进入学校 601 创新电子实验室。在这里，我遇到了非常优秀的团队，徐焱、钱少伟、杨昱泽、王子佳、葛雪莲学长学姐带我成长，在专业学习和生活中给予我极大的支持与帮助。特别地，也正是有了陈磊、邓小颖、陈卫峰老师建立的平台，让我受益良多。言有尽而意无穷，此时再多的言辞也表达不了我内心的感谢。在论文结尾处，请允许我向他们表示最诚挚的感谢，也衷心祝愿 601 创新电子实验室取得更好的成绩。

## 参考文献

- [1] 李如年, 王敬, 王海. 新概念动能武器—电磁炮[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(02):125-129.
- [2] 王笑梦. “全电动”武器装备的春天到了吗? [N]. 解放军报, 2020-03-27(009).
- [3] 吴松森. 基于图像的二自由度云台系统关键技术研究[D]. 南京航空航天大学, 2016.
- [4] 肖杨. 基于双环结构的视觉伺服云台设计与控制[D]. 华南理工大学, 2018.
- [5] 刘增俊. 模拟电磁曲射炮的设计[J]. 技术与市场, 2019, 26(11):77-78.
- [6] 柏兴林. 三级重接型电磁发射测控单元的设计与实现[D]. 大连理工大学, 2005.
- [7] 章勇. 机器学习在电磁炮系统效能评估中的应用研究[D]. 中北大学, 2019.
- [8] 林庆华, 栗保明. 一种用于电磁炮的瞬态多物理场求解器[J/OL]. 兵工学报:1-11[2020-05-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20200509.1531.014.html>.
- [9] 沈剑, 王少龙, 宁益晨, 陈国光, 田晓丽, 闫小龙. 电磁炮超高速弹丸膛内运动稳定性研究[J/OL]. 弹箭与制导学报:1-5[2020-05-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1234.tj.20200428.1805.014.html>.
- [10] Jian Shen, Shao-bo Fan, Ya-xin Ji, Qing-yu Zhu, Ji Duan. Aerodynamics analysis of a hypersonic electromagnetic gun launched projectile[J]. Defence Technology, 2020.
- [11] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009:221-243.
- [12] 向红军. 电磁感应线圈炮原理与技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2015.12
- [13] 马颂德, 张正友. 计算机理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [14] 陈远兵. 电容式电磁炮电源电路设计[J]. 信息通信, 2015(06):86.