2019年TI杯

全国大学生电子设计竞赛设计报告

选 题： 模拟电磁曲射炮

摘要

本系统以STM32F407为核心，使用电磁炮发射装置，舵机二维云台，摄像头，激光测距模块以及人机交互模块等，实现了模拟电磁曲射炮发射装置。本系统使用BOOST升压电路对电容进行充电，使用摄像头与激光测距模块，能够快速寻找到引导标识，测量标识与炮筒之间的距离，通过控制云台水平转动和垂直转动的角度，准确地向环形靶发射电磁炮。最终经过调试，本系统实现了基本要求与发挥部分的所有功能，发挥部分误差稍大。电磁炮发射装置在3s内能够将电容充满电，在发射电磁炮时，弹丸落点与靶心的距离不超过5cm。本系统具有良好的稳定性，在云台的角度一定的情况下，每次发射出的炮弹的落点基本相同。

关键词：电磁炮；BOOST升压电路；二维云台

# 系统方案

## 技术路线

本系统使用稳压源和BOOST升压电路对电容进行充电，当电容充满电后，断开充电回路，闭合电容与线圈组成的放电回路，此时，由于电容的放电作用，线圈内会出现变化的磁场，根据楞次定律，炮筒内的弹丸会受到一个阻止磁通量变化的力，这个力能够将弹丸发射出去。

本系统使用了摄像头与激光测距模块，能够快速地标定引导标识与炮筒的距离。使用MATLAB拟合出弹丸射击距离与炮筒的角度之间的关系式，根据测距模块返回的数值推算炮筒抬起角度，从而将弹丸准确打到目标点。

## 系统结构

本系统由电磁炮发射装置，二维云台，摄像头，测距模块以及人机交互模块等组成。在开始运行后，单片机控制电源对电容进行充电，并进行分压ADC采样，当电压升到目标值后，单片机断开充电回路。通过摄像头和测距模块测得环形靶与炮筒的距离，也可使用串口屏输入环形靶与炮筒的距离，单片机通过此距离计算得到二维云台的俯仰角，闭合电容放电回路，将电磁炮发射。

系统结构如图1所示。

图1 系统结构图

## 方案论证

##  弹丸发射控制方案选择

方案一：控制弹丸以恒定初速度发射。保持电容充电的电压不变，通过改变二维云台的俯仰角调整弹丸射出的轨道，实现对射出距离的控制。此方案控制思路较为简单，易于实现。

方案二：控制弹丸以恒定俯仰角发射。保持云台的俯仰角不变，改变电容的充电电压，可以改变弹丸射出的初速度，从而改变射出距离。此方案需要通过ADC采样对电压进行精确控制，通过改变电压大小控制射出距离，受外界因素干扰较大。

方案一较方案二控制方法更为简便，计算简单，且受外界因素干扰较小，所以经过考虑，最终选择方案一。

##  测距模块的选择

方案一：使用超声波测距模块进行测距。超声波测距模块通过发射超声波并测量其往返时间计算得到物体的距离。其测量精度较高，在4cm至4.5m的测量范围内误差能保持在3cm以内，但在距离较大时需要被测物有较大面积，否则无法准确接收到反射回来的超声波。

方案二：使用激光测距模块进行测距。激光测距模块的原理与超声波模块相似，其通过发射激光并测量激光往返时间通过计算得到物体距离。其测量范围为5cm至4m，误差在4cm以内，其对于被测物的面积要求较低。

由于题目要求的引导标识面积较小，使用超声波模块难以检测到返回的声波，相比较激光测距模块更适合本设计，所以最终选择方案二。

# 理论分析与计算

## 2.1 电磁炮参数计算与能量分析

本次设计使用了BOOST升压电路对电容进行充电，BOOST电路输出电压与输入电压的关系式为

$$ V\_{OUT}=\frac{V\_{IN}}{1-D} (1)$$

通过改变PWM的占空比，在输入电压一定的情况下，可以得到不同的输出电压，使用此电压给电容充电，电容充电后，电容的能量为：

$$ E\_{c}=\frac{1}{2}CU^{2} (2)$$

当电容放电回路接通后，经过电容的电流值：

$$ I=C\frac{dU}{dt} (3)$$

根据毕奥-萨法尔定律，线圈内的磁感应强度

$$ B=\frac{μ\_{0}nI}{2}\frac{l}{\left（\frac{l^{2}}{4}+R^{2}\right）^{\frac{1}{2}}} (4)$$

式（4）中l为线圈长度，R为线圈半径。弹丸在线圈内受到的安培力

$$ F=BIL (5)$$

这个力为弹丸提供加速度，使弹丸以一定的速度打出炮筒。在理想状态下，若电容内的能量全部转化为动能，则弹丸射出的初速度为

$$ V=U\sqrt{\frac{C}{m}} \left(6\right)$$

式中m为弹丸质量，由上可得，当电容电压不变时，弹丸射出速度也不变。

## 2.2 弹道分析

电磁炮模型图如图2所示。



图2 电磁炮模型图

设炮筒俯仰角为$θ$，弹丸发射的初速度为$v\_{\begin{array}{c}0\\\end{array}}$，重力加速度为g，运动时间为t，云台自身高度为h，在忽略空气阻力的情况下，弹丸在水平方向和竖直方向的运动距离分别为：

$$ \left\{\begin{array}{c}x=v\_{0}cosθt (7)\\y=h+v\_{0}\sin(θt)-\frac{1}{2}gt^{2} (8)\end{array}\right. $$

将（7）式带入（8）式得

$$ y=-\frac{1}{2}\frac{g}{v\_{0}^{2}}cos^{2}θx^{2}+\tan(θ)+h (9)$$

当y为0时，取x大于0的解为

$$ x=\frac{v^{2}\sin(2θ)+2v\cos(θ\sqrt{v^{2}sin^{2}θ+2gh})}{2g} (10)$$

由于云台高度相对很低，可以忽略不计，所以最终可以将弹丸在水平面的位移化简为

$$ x=\frac{v^{2}\sin(2θ)}{g} (11)$$

# 硬件电路设计

## 3.1 DC-DC电路设计与分析

本次设计使用双向DC-DC电路中的升压模块电路，此双向DC-DC电路由IR2104驱动器，MOSFET构成的双向拓扑组成。STM32单片机发出PWM波形经过IR2104驱动芯片之后，增大其输出电流，具有很强的驱动负载能力，从而能够驱动MOSFET管实现恒压恒流功能。

MOSFET双向拓扑电路原理图如图3所示：



图3 MOSFET双向拓扑电路图

当IN端作为输入，OUT端作为输出时，该拓扑构成一个Buck电路，实现降压恒流输出功能；当OUT端作为输入，IN端作为输出时，该拓扑构成一个BOOST电路，实现升压恒压输出功能。在本次设计中，根据计算与与调试，最终选择将24V电压升至48V电压给电容充电，根据BOOST升压电路计算公式（1），将VOUT=2VIN带入，可得单片机输出PWM信号的占空比为50%。

## 3.2 电容放电发射电路设计与分析

电容放电发射电路为一个LC电路，在LC回路中，通过电容器的充电和放电及振荡线圈阻碍电流变化的作用，线圈中形成了周期性变化的振荡电流，电容器板间形成了周期性变化的电荷，形成电磁振荡，电磁振荡的过程实质上是电容器中的电场和自感线圈中的磁场相互转化的过程。

当电容C充满电后，导通发射回路，电容快速放电，磁感线圈L中产生磁场，根据式（4）与式（5），可得弹丸受到的安培力与电流的二次方成正比，即

$$ F=kI^{2} (12)$$

式中k为比例系数。由此可见，要想弹丸获得高速度，必须在线圈内提供大电流，由式（3）可得，电流大小与电容两端电压变化快慢有关。在LC回路中，振荡周期为

$ T=2π\sqrt{LC} (13)$

可以看出，振荡周期T随着电容值C的增大而增大，导致电压变化率减小， 另根据式（4）可以得出电流随电容值C的增大而增大，所以需要合理选择电容值与电感值。经过计算与测试，最终使用3个3300uF，耐压值为100V的电容，线圈电感值为69uH。

# 软件设计

## 4.1 系统流程框图

系统整体框图如图4所示，单片机复位后，初始化各个模块，然后进行模式选择，确定模式后，单片机输出PWM使BOOST升压电路对电容进行充电，充电完成后，可以手动或自动发射弹丸。

图4 软件整体框图

## 4.2 舵机转角控制程序设计

舵机转角控制程序流程图如图5所示。

图5 舵机转角控制程序流程图

在进入舵机控制函数后，摄像头采集当前引导标识的位置，通过当前图像与目标图像像素点的偏差计算得到水平舵机转动角度，使炮筒与靶心处于同一垂直面。激光测距模块测量炮筒与标识之间的距离，经过MATLAB拟合函数计算得到垂直舵机转动角度，实现对弹丸发射距离的控制。

# 测试结果

## 5.1 测试仪器

表1 测试仪器

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 名称 | 型号 | 数量 |
| 1 | 直流稳压电源 | RIGOL-DP832 | 1 |
| 2 | 量角器 | 精度1° | 1 |
| 3 | 5m卷尺 | 精度1mm | 1 |
| 4 | 秒表 | 精度0.1s | 1 |

## 5.2测试结果

**1）基本要求部分测试**

①基本要求（1）测试

测试方法：系统供电后，使用开关控制弹丸发射。

经测试，每次电容充电后均能将弹丸射出，满足题目要求。

②基本要求（2）测试

测试方法：使用开关控制弹丸发射，使用卷尺测量弹丸落点与靶心距离。

表2 定距发射测试结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 设定射出距离/cm | 实际射出距离/cm | 误差绝对值/cm |
| 1 | 210 | 208 | 2 |
| 2 | 240 | 237 | 3 |
| 3 | 270 | 271 | 1 |
| 4 | 300 | 295 | 5 |

结果分析：在定距发射时，弹丸落点的位置与目标位置相差较小，误差可保持在5cm以内，满足题目要求。

③基本要求（3）测试

测试方法：使用串口屏输入环形靶心与定标点的距离及与中心轴线的偏离角度，一键启动，记录弹丸击中环数。

表3 定角定距测试结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 设定偏离角度/° | 设定射出距离/cm | 击中环数 |
| 1 | 15 | 240 | 10 |
| 2 | -15 | 270 | 9 |
| 3 | 25 | 240 | 9 |
| 4 | -25 | 270 | 10 |

结果分析：在确定距离和偏角后发射弹丸，弹丸的落点与靶心相距较小，多数能落在9环以内。

**2）发挥部分测试**

①发挥部分要求（1）测试

测试方法：在测试范围内任意放置环形靶，一键启动，记录弹丸击中环数，使用秒表测量完成时间。

表4 寻标自瞄测试结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 定标点与靶心距离/cm | 击中环数 | 完成时间/s |
| 1 | 220 | 8 | 2.6 |
| 2 | 250 | 6 | 3.0 |
| 3 | 280 | 4 | 3.3 |

结果分析：当定标点与靶心相距较近时，射击的精度较高，当定标点与靶心相距较远时，射击的精度会变低，分析原因可能是当距离较远时，激光测距模块的精度也会降低，导致误差偏大。

②发挥部分要求（2）测试

测试方法：将环形靶放置在距离定标点250cm的弧线上，使炮管在-30°至30°的水平转动范围内做往复运动，在运动过程中电磁炮自动搜寻目标并射击，记录弹丸击中环数，使用秒表测量完成时间。

表5 转动发射测试结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 标识偏角/° | 击中环数 | 完成时间/s |
| 1 | 10 | 6 | 2.6 |
| 2 | 20 | 6 | 4.1 |
| 3 | -20 | 5 | 7.4 |

结果分析：当云台在水平转动的同时发射弹丸，弹丸能落在靶上，但精度较低，分析原因可能是弹丸产生水平速度的分量，导致弹丸在水平方向上误差较大。

## 5.3 测试结果分析

根据以上测试结果，本系统的基础部分要求完成度较好，误差基本控制在5cm以内，击中环数多数为9环或10环，但在发挥部分只能打在6环左右，其具体原因是激光测距模块在实际运行中测量存在误差，且在炮筒水平转动过程中发出的弹丸会具有一定的水平速度分量，导致落点在水平方向出现少量偏差，若在程序中对此误差进行补偿可能会进一步提高准确度。

# 总结

本次设计实现了题目要求的全部功能，包括基本功能要求和发挥部分的功能要求，其中基本功能部分的精度较发挥部分高，落点与靶心的距离能保持在5cm以内，基本为9环或10环。本系统通过理论计算得到了合理的设计方案，以STM32F407为主控芯片，采用BOOST升压电路和磁感线圈设计并实现了模拟电磁曲线炮，通过实际测试，定点发射精度较高，误差可控制在5cm以内。