

# 《自动控制实践 A 课程设计》答辩

学号： 180610112      190410102

姓名： 马光远      方尧

# 设计 1：电机选型计算与设计

马光远

# 1. XY 运动控制平台组成

XY 运动控制平台主要由三大部分组成：**GEN 运动控制卡**、**电控柜**、**XY 运动平台本体**。其中，控制器主要对应 GHN 运动控制卡，驱动器在电控柜中，传感器主要由增量式编码器和光栅尺组成。

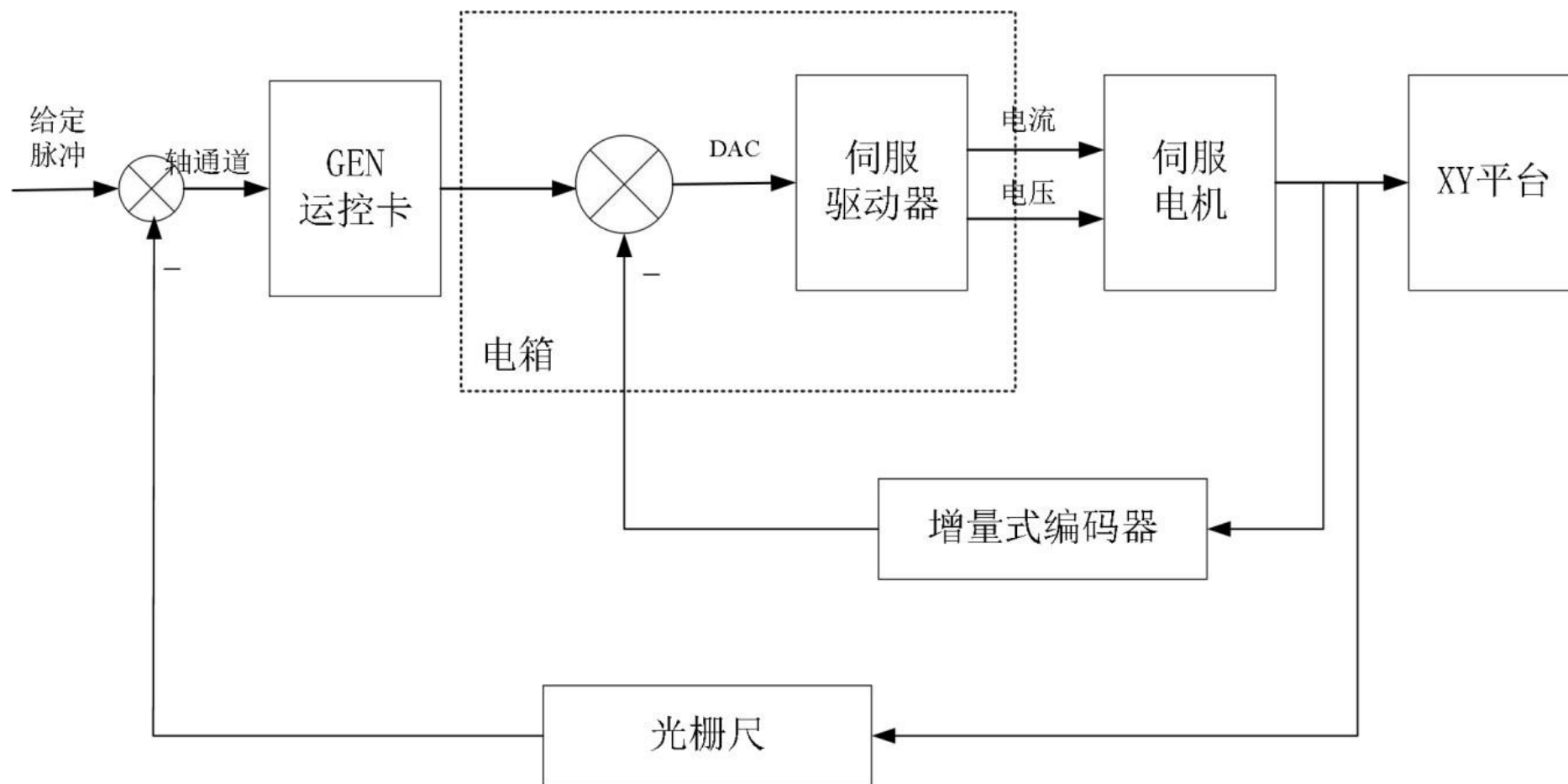


图 1 控制系统框图

# 1. XY 运动控制平台组成

XY 运动控制平台主要由三大部分组成：**GEN 运动控制卡**、**电控柜**、**XY 运动平台本体**。其中，控制器主要对应 GEN 运动控制卡，驱动器在电控柜中，传感器主要由增量式编码器和光栅尺组成。

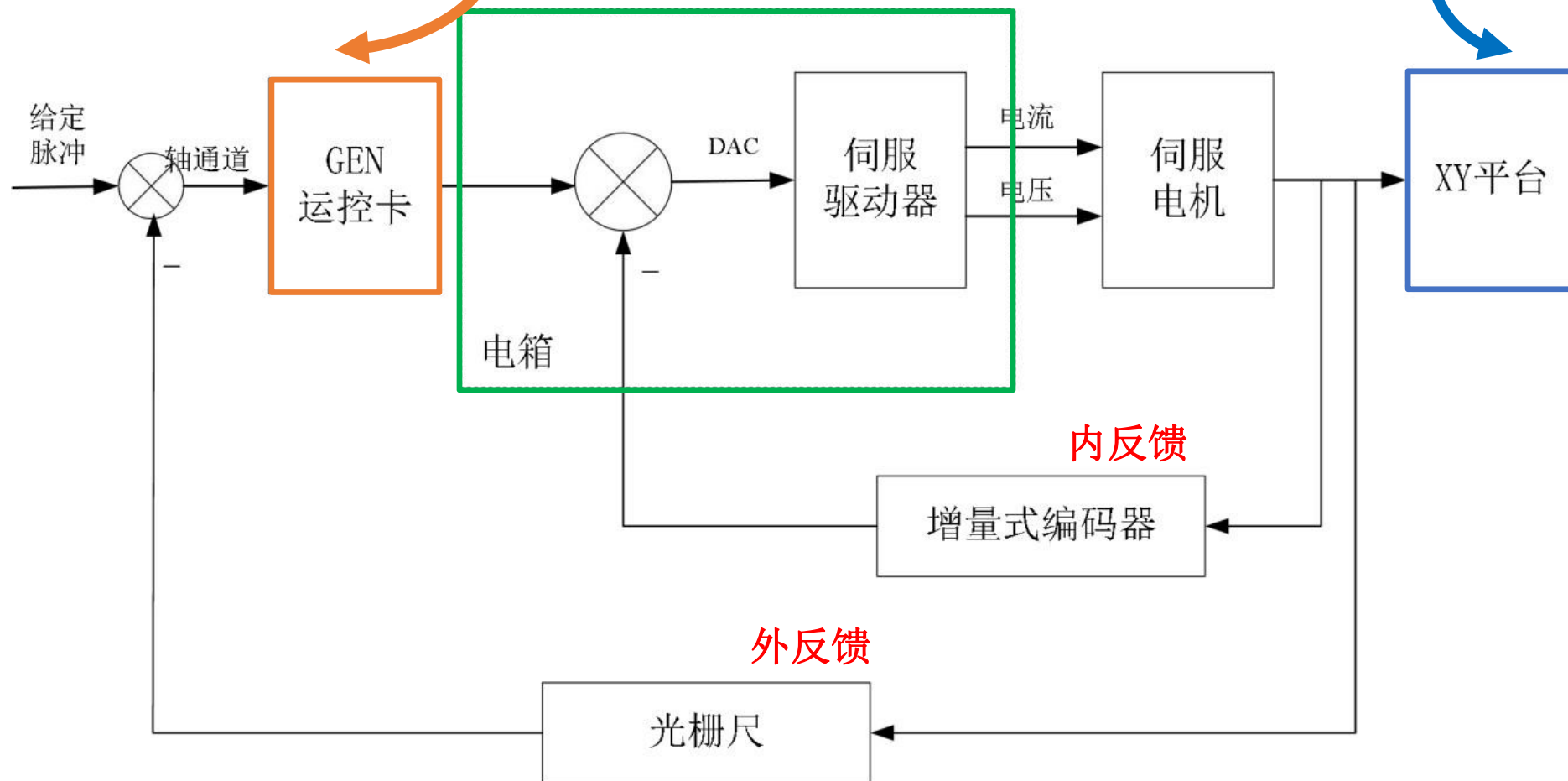


图 1 控制系统框图

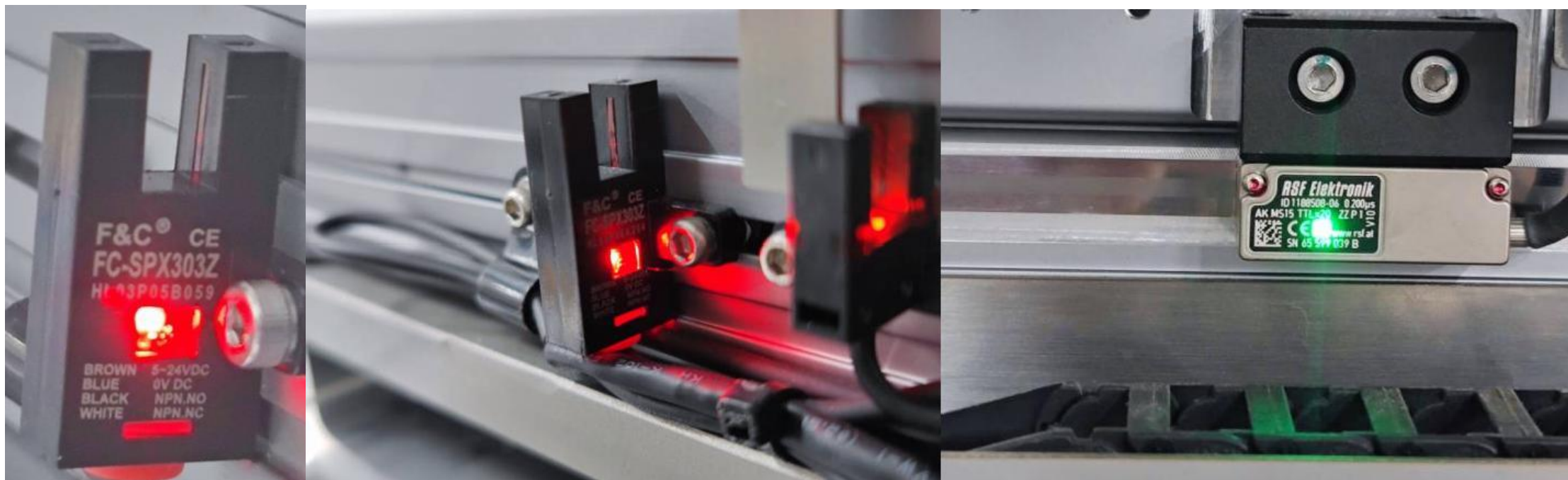


图 2 光栅尺与读数头



图 3 Y 轴安川电机与参数

# 1. XY 运动控制平台组成

实验中用到了多种型号的电机（安川、多摩川、松下），这里以安装在 Y 轴上的安川电机和安装在 X 轴上的多摩川电机为例，给出电机参数。

电机参数	单位	Y 轴安川电机	X 轴多摩川电机
电机型号	/	SGM7J-02AFC6S	TS4603N1680E200
额定扭矩	W	0.637	0.64
瞬时最大扭矩	N·m	2.23	1.91
额定转速	r/min	3000	3000
最大转速	r/min	6000	5000
Encoder 电机转子惯量	kg·m²	2.63×10 <sup>-5</sup>	1.9×10 <sup>-5</sup>
Resolver 电机转子惯量	kg·m²	0.333×10 <sup>-5</sup>	2×10 <sup>-5</sup>
每秒最大功率	kW	15.4	21.5
额定电流	A	1.6	1.7
瞬时最大电流	A	5.8	5
极对数	对	4	4

表 1 电机参数

## 2. 分析验证运动平台所选择的电机是否合理

测绘并用 Solidworks 绘制 XY 平台机械部分。因联轴器等结构过于复杂，经分析认为其可忽略，故此部分主要考虑的构件为负载平台和丝杠。

### a. 负载平台

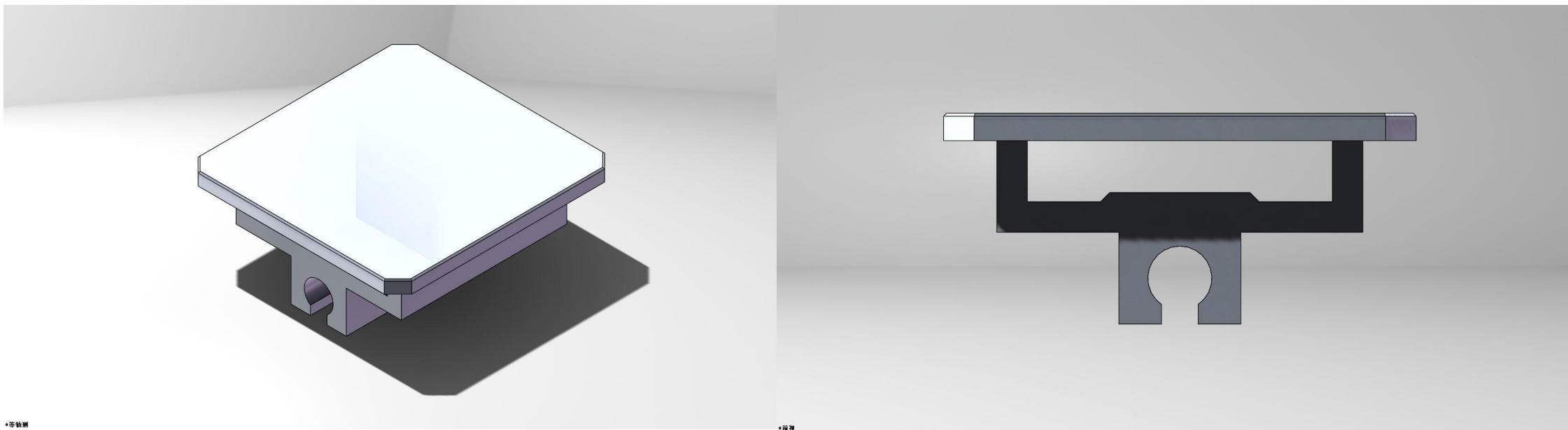


图 5,6 负载平台 Solidworks 模型



## 2. 分析验证运动平台所选择的电机是否合理

2\_载物台 的质量属性

配置: 默认

坐标系: -- 默认 --

密度 = 0.000 千克 / 立方毫米

**质量 = 1.420 千克**

体积 = 525825.766 立方毫米

表面积 = 109355.450 平方毫米

重心 : ( 毫米 )

X = 0.000

Y = -23.455

Z = 0.000

惯性主轴和惯性主力矩: ( 千克 \* 平方毫米 )

由重心决定。

$I_x = ( 0.000, 0.000, 1.000 )$       $P_x = 2614.330$

$I_y = ( 1.000, 0.000, 0.000 )$       $P_y = 2761.028$

$I_z = ( 0.000, 1.000, 0.000 )$       $P_z = 4335.334$

惯性张量: ( 千克 \* 平方毫米 )

由重心决定，并且对齐输出的坐标系。

$L_{xx} = 2761.028$       $L_{xy} = 0.000$       $L_{xz} = 0.000$

$L_{yx} = 0.000$       $L_{yy} = 4335.334$       $L_{yz} = 0.000$

$L_{zx} = 0.000$       $L_{zy} = 0.000$       $L_{zz} = 2614.330$

惯性张量: ( 千克 \* 平方毫米 )

由输出坐标系决定。

$I_{xx} = 3542.085$       $I_{xy} = 0.000$       $I_{xz} = 0.000$

$I_{yx} = 0.000$       $I_{yy} = 4335.334$       $I_{yz} = 0.000$

$I_{zx} = 0.000$       $I_{zy} = 0.000$       $I_{zz} = 3395.387$

## 2. 分析验证运动平台所选择的电机是否合理

负载平台选用的材料为 1060 合金，其材料属性为

属性	数值	单位
弹性模量	6.9e+010	牛顿/m^2
中泊松比	0.33	不适用
中抗剪模量	2.7e+010	牛顿/m^2
质量密度	2700	kg/m^3
张力强度	68935600	牛顿/m^2
压缩强度		牛顿/m^2
屈服强度	27574200	牛顿/m^2
热膨胀系数	2.4e-005	/K
热导率	200	W/(m·K)
比热	900	J/(kg·K)
材料阻尼比率		不适用

图 7 1060 合金材料属性

## 2. 分析验证运动平台所选择的电机是否合理

### b. 丝杠

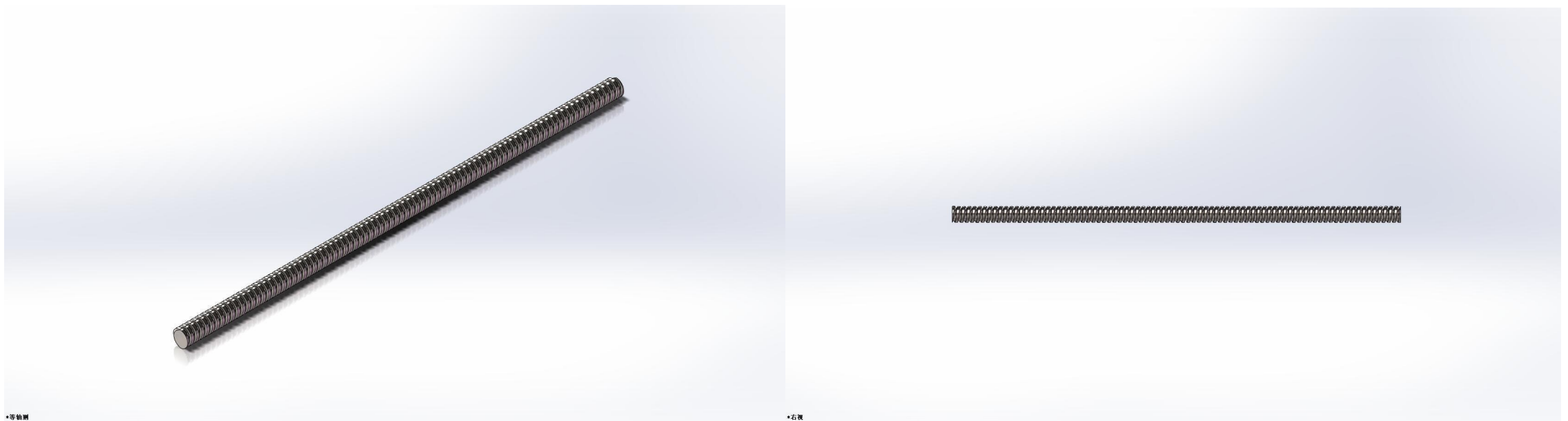


图 5,6 负载平台 Solidworks 模型

## 2. 分析验证运动平台所选择的电机是否合理

### 1\_丝杆 的质量属性

配置：默认

坐标系：-- 默认 --

密度 = 0.000 千克 / 立方毫米

质量 = **0.501** 千克

体积 = 65096.410 立方毫米

表面积 = 26630.618 平方毫米

重心 : ( 毫米 )

X = 0.000

Y = 0.000

Z = 212.493

惯性主轴和惯性主力矩: ( 千克 \* 平方毫米 )

由重心决定。

$I_x = ( 0.000, 0.000, 1.000 )$        **$P_x = 12.692$**

$I_y = ( 0.707, -0.707, 0.000 )$        **$P_y = 7551.187$**

$I_z = ( 0.707, 0.707, 0.000 )$        **$P_z = 7551.187$**

惯性张量: ( 千克 \* 平方毫米 )

由重心决定，并且对齐输出的坐标系。

$L_{xx} = 7551.188$        $L_{xy} = 0.000$        $L_{xz} = 0.000$

$L_{yx} = 0.000$        $L_{yy} = 7551.186$        **$L_{yz} = 0.363$**

$L_{zx} = 0.000$        **$L_{zy} = 0.363$**        $L_{zz} = 12.692$

惯性张量: ( 千克 \* 平方毫米 )

由输出坐标系决定。

$I_{xx} = 30183.958$        $I_{xy} = 0.000$        **$I_{xz} = 0.027$**

$I_{yx} = 0.000$        $I_{yy} = 30183.956$        **$I_{yz} = 0.354$**

**$I_{zx} = 0.027$**        **$I_{zy} = 0.354$**        $I_{zz} = 12.692$

## 2. 分析验证运动平台所选择的电机是否合理

丝杠选用的材料为合金钢，其材料属性为

属性	数值	单位
弹性模量	2.1e+011	牛顿/m^2
中泊松比	0.28	不适用
中抗剪模量	7.9e+010	牛顿/m^2
质量密度	7700	kg/m^3
张力强度	723825600	牛顿/m^2
压缩强度		牛顿/m^2
屈服强度	620422000	牛顿/m^2
热膨胀系数	1.3e-005	/K
热导率	50	W/(m·K)
比热	460	J/(kg·K)

图 10 合金钢材料属性

属性	数值	单位
弹性模量	6.9e+010	牛顿/m^2
中泊松比	0.33	不适用
中抗剪模量	2.7e+010	牛顿/m^2
质量密度	2700	kg/m^3
张力强度	68935600	牛顿/m^2
压缩强度		牛顿/m^2
屈服强度	27574200	牛顿/m^2
热膨胀系数	2.4e-005	/K
热导率	200	W/(m·K)
比热	900	J/(kg·K)
材料阻尼比率		不适用

负载平台选用的材料为 1060 合金

属性	数值	单位
弹性模量	2.1e+011	牛顿/m^2
中泊松比	0.28	不适用
中抗剪模量	7.9e+010	牛顿/m^2
质量密度	7700	kg/m^3
张力强度	723825600	牛顿/m^2
压缩强度		牛顿/m^2
屈服强度	620422000	牛顿/m^2
热膨胀系数	1.3e-005	/K
热导率	50	W/(m·K)
比热	460	J/(kg·K)

丝杠选用的材料为合金钢

## 2. 分析验证运动平台所选择的电机是否合理

由 Solidworks 测绘得，负载平台的质量为

$$m_1 = 1.420kg$$

丝杠的质量为

$$m_2 = 0.501kg$$

(1) 负载转矩的折算（静态转矩按功率守恒原则折算）

计算负载折算到电机端的转矩的基本公式有

$$\begin{aligned} F_L &= F_a + m_1 a \\ (T + J\epsilon) \cdot 2\pi &= F_L t \\ F_s &= \frac{2\pi(T + J\epsilon)}{t} = ma \end{aligned}$$

## 2. 分析验证运动平台所选择的电机是否合理

(1) 负载转矩的折算（静态转矩按功率守恒原则折算） 计算

其中  $m_1$  为工作台质量； $a$  为工作台加速度； $F_a$  为负载力；本实验无负载力， $F_a = 0$ ； $t$  为丝杆导程， $t = 5mm$ ；由实验要求，速度  $v = 500mm/s$ ，加速度  $a = 1g = 9.8m/s^2$ 。

折算到电机轴上，有

$$T_L^m = \frac{T + J\epsilon}{i\eta} = \frac{m_1 a t}{2\pi i \eta}$$

由于本实验使用的时丝杆联轴器，无齿轮，故传动  $i = 1$ ，传动效率  $\eta = 100\%$ 。代入数据计算得

$$T_L^m = 0.01036N \cdot m$$



## 2. 分析验证运动平台所选择的电机是否合理

### (2) 转动惯量的折算（按能量守恒关系折算）

#### a. 负载平台折算到电机轴的转动惯量

折算的基本原则是：折算前的多轴系统同折算后的单轴系统在能量关系上或功率关系上保持不变。

故有能量守恒

$$\frac{1}{2}m_1v^2 = \frac{1}{2}J_L\omega^2$$

即有

$$J_L = m_1\left(\frac{t}{2\pi}\right)^2 = 8.992 \times 10^{-7} \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

## 2. 分析验证运动平台所选择的电机是否合理

(2) 转动惯量的折算（按能量守恒关系折算）

b. 丝杠的转动惯量

查阅上一步 Solidworks 建模得到的结果，显然此处应该采用绕惯性主轴旋转的三个转动惯量中的最小的一个，则有

$$J_s = P_x = 12\,692\text{kg}\cdot\text{mm}^2 = 1.2692 \times 10^{-5}\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

c. 电机轴上的总转动惯量

$$J_D = J_L + J_s = 1.3591 \times 10^{-5}\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

## 2. 分析验证运动平台所选择的电机是否合理

(3) 电机轴上的总转矩并校核

$$\frac{\omega t}{2\pi} = v$$

求导，得加速度关系

$$a = \frac{2\pi}{t} a$$

电机轴上的总转矩等于

$$T_e = J_D a + T_0 + T_s$$

由于丝杠与联轴器自身的转矩 $T_s$ 难以计算，电机空载转矩 $T_0$ 较小，故忽略上述两项。

带入计算得

$$T_e = 0.1674 N \cdot m$$

查表可知，电机额定输出转矩 $T_N = 0.671 N \cdot m > T_e$ ，故电机转矩符合使用需求。

## 2. 分析验证运动平台所选择的电机是否合理

### (4) 验证惯量匹配

电机转子惯量  $J_M = 5.960 \times 10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^2$

电机轴转动惯量  $J_D = 1.3591 \times 10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^2$

有

$$\frac{J_M}{J_D} = 4.385$$

查阅电机使用手册，电机转子惯量 $J_M$ 与折算到电机轴上的转动惯量匹配要求

$$0.25 < \frac{J_M}{J_D} < 5$$

故惯量匹配。

## 2. 分析验证运动平台所选择的电机是否合理

### (5) 校验平台精度

由使用手册，光栅尺精度可以等效为其分辨力 $\pm 5\mu\text{m}$ 或 $\pm 15\mu\text{m}$ ,故满足 $\pm 20\mu\text{m}$ 的使用精度要求。

### (6) 校验光栅尺分辨力

实验台使用的光栅尺型号为 RSF (MS 15.X4MK)，读数头为 RSF (MS 15.TTLX20)。查询 RS 官方用户手册可知，该读数头的分辨力为 $0.5\mu\text{m}$ ，故满足实验平台 $5\mu\text{m}$ 的使用要求。

## 2. 分析验证运动平台所选择的电机是否合理

### (7) 计算编码器当量和脉冲当量

实验平台要求的编码器当量为

$$\frac{5mm}{5\mu m} = 1000$$

若选择2500线的增量式编码器，使用四倍频计数，则编码器当量为10000，满足实验平台要求的编码器当量。

对于上述编码器，每转一圈发出10000个脉冲（ $10000p/r$ ），丝杠导程 $t = 5mm/r$ ，故脉冲当量为 $10000/5 = 2000p/mm$ 。

## 2. 分析验证运动平台所选择的电机是否合理

### (8) 校验电机转速和分辨率

实验要求的电机转速为

$$v = 500mm/s = 6000rpm$$

查阅使用手册可知，电机的最大转速  $v_{max} = 6000rpm > v$ ，故电机转速满足实验要求。

实验要求的电机分辨率为  $10000p/r$ 。

查阅使用手册可知，电机最大可200倍分频，故电机最大分辨率为

$2500 \times 200 = 500000p/r > 10000p/r$ ，故电机分辨率满足实验要求。

## 2. 分析验证运动平台所选择的电机是否合理

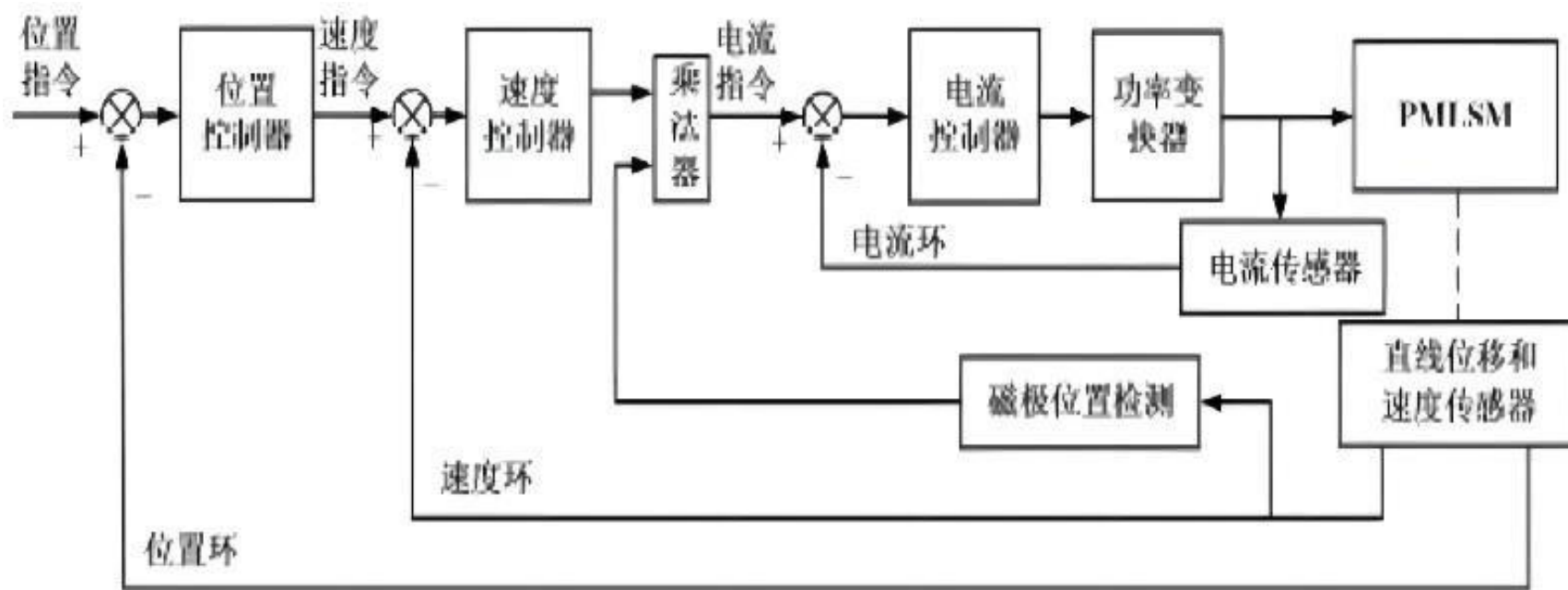
合理！

需求		额定	
电机轴上的总转矩	$T_e = 0.1674N \cdot m$	电机额定输出转矩	$T_N = 0.671N \cdot m$
惯量匹配	4.385	惯量匹配	0.25~5
光栅尺精度	$\pm 20\mu m$	光栅尺精度	$\pm 5\mu m, \pm 15\mu m$
光栅尺读数头 分辨力	$\pm 5\mu m$	光栅尺读数头 分辨力	$\pm 0.5\mu m$
编码器当量	1000	编码器当量	10000
电机转速	6000rpm	电机转速	6000rpm
电机分辨率	10000	电机分辨率	500000



# 设计 2：电机控制与驱动电路 设计，运动曲线测试

## 4.3.1 控制卡与驱动器的主要信号流通路径



主要信号流通路径：

控制卡通过 PCI-e 总线协议插槽连接到 PC 端，通过“固高运动控制平台软件”发送脉冲信号控制驱动器，驱动器接收到脉冲信号后产生相应的电枢电路，驱动电机运转后从电机编码器反馈出电机位置到伺服驱动器，从模组光栅尺反馈丝杆模组的位置到 GHN 控制卡从而达到控制位置的目的。

## 4.3.2 当量变换关系计算

① 给定较大指定数量脉冲（如 20000），目测数出所转圈数

② 给定较大指定数量脉冲（如 20000），用游标卡尺测量载物台位移

20000 脉冲对应 10mm 位移，丝杆螺距  $P=5\text{mm}$ ，可以得到对应圈数  $=10\text{mm}/5\text{mm}=2$  转

当量关系为 10000 脉冲对应 1 转。

分辨力为  $360^\circ/10000=0.036^\circ$ （2.16 角分）

### 4.3.3 绘制电机驱动电路和位置模式下系统的电气连接图

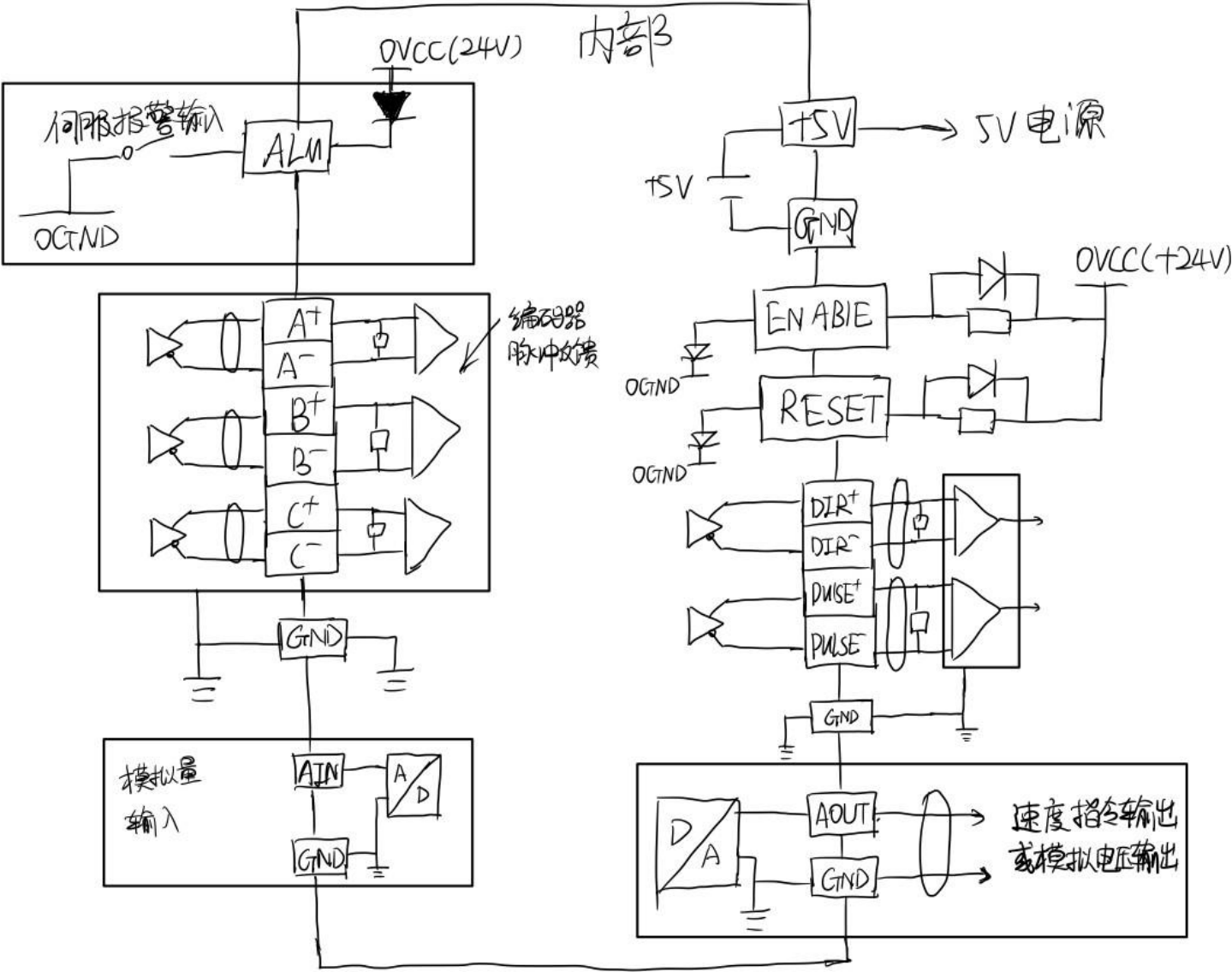


图 13 端子板内部电路结构

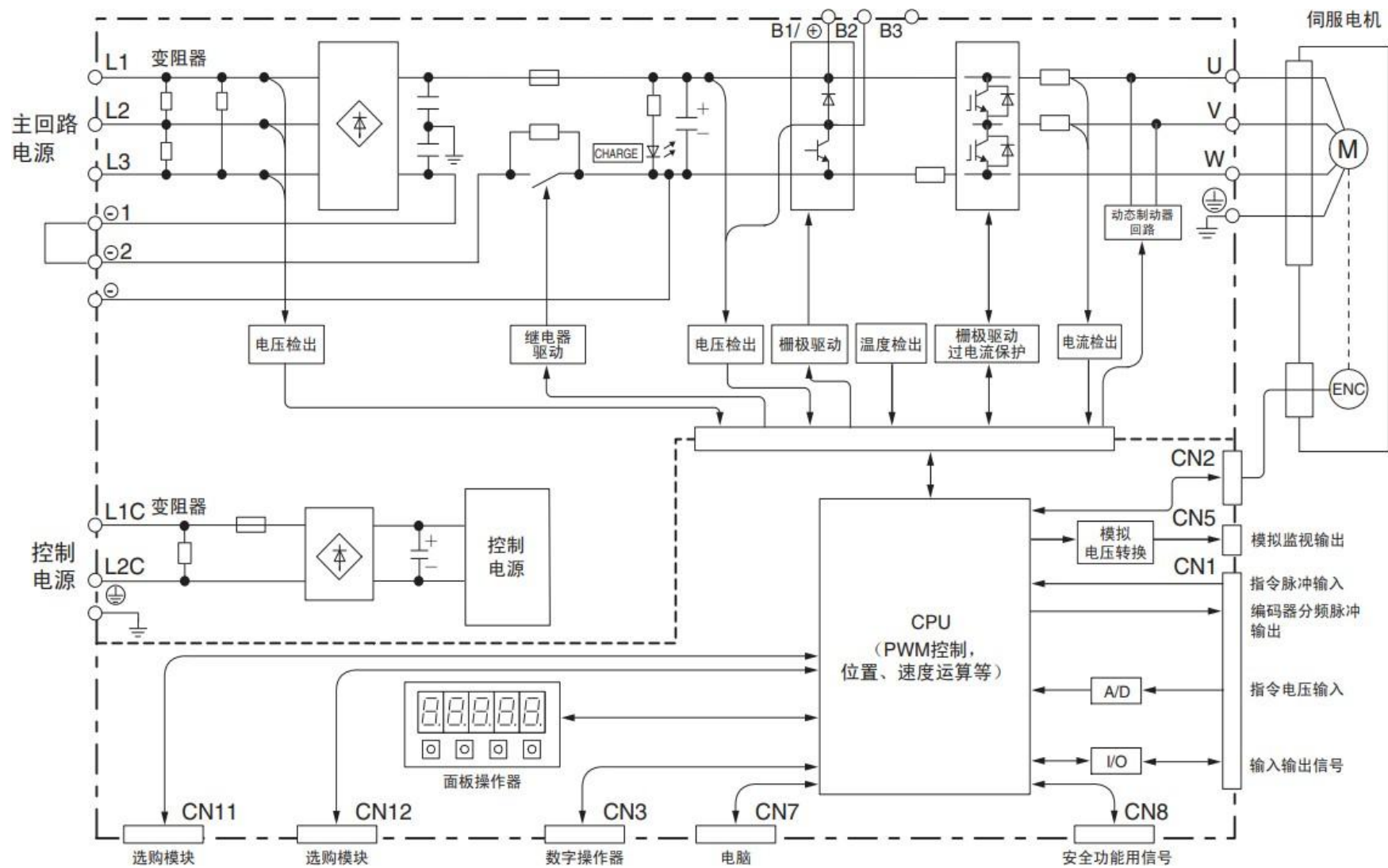
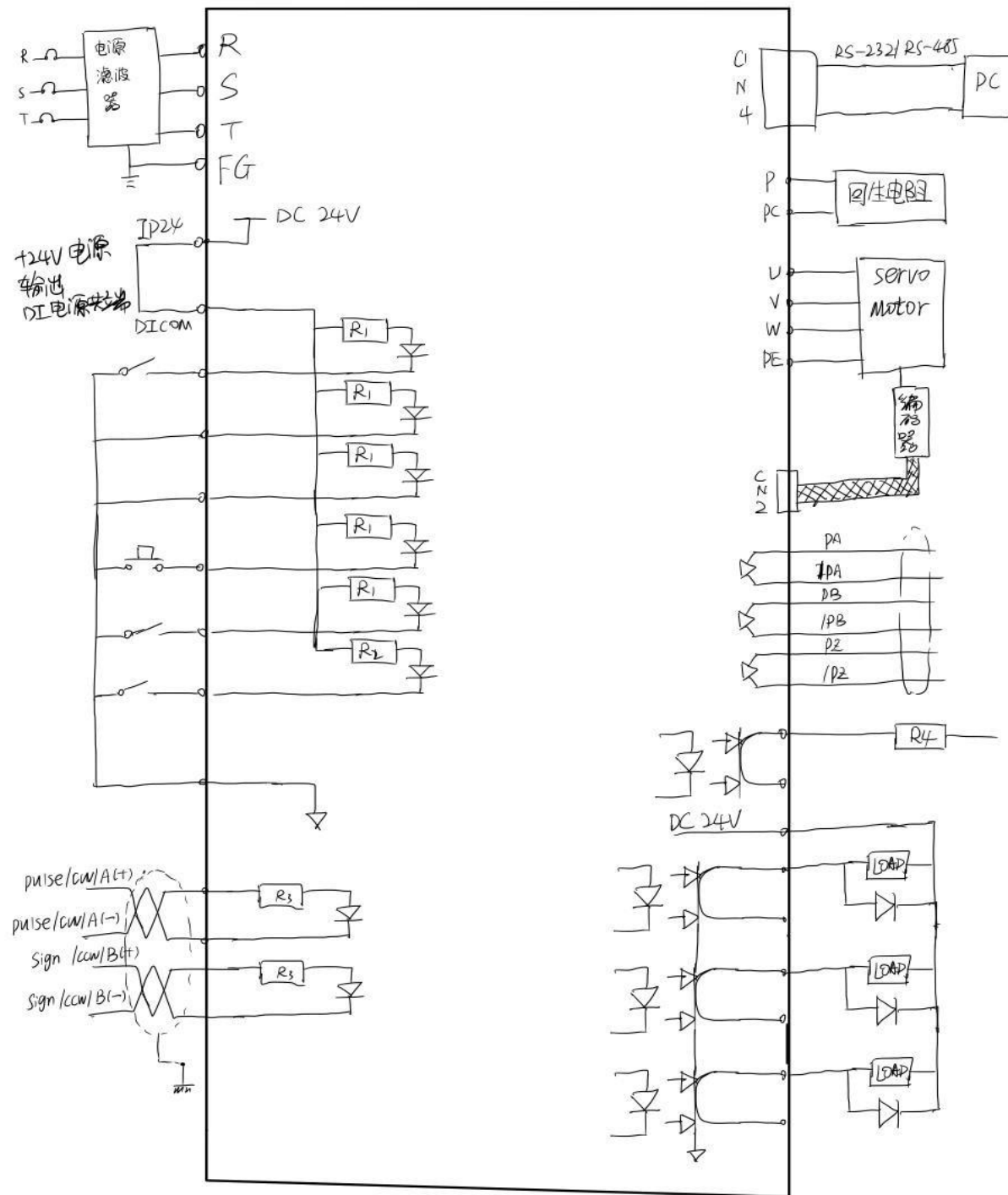


图 14 电机驱动电路

位置控制下电气连接图:



## 4.3.4 测试并读取电机指令曲线与运动曲线

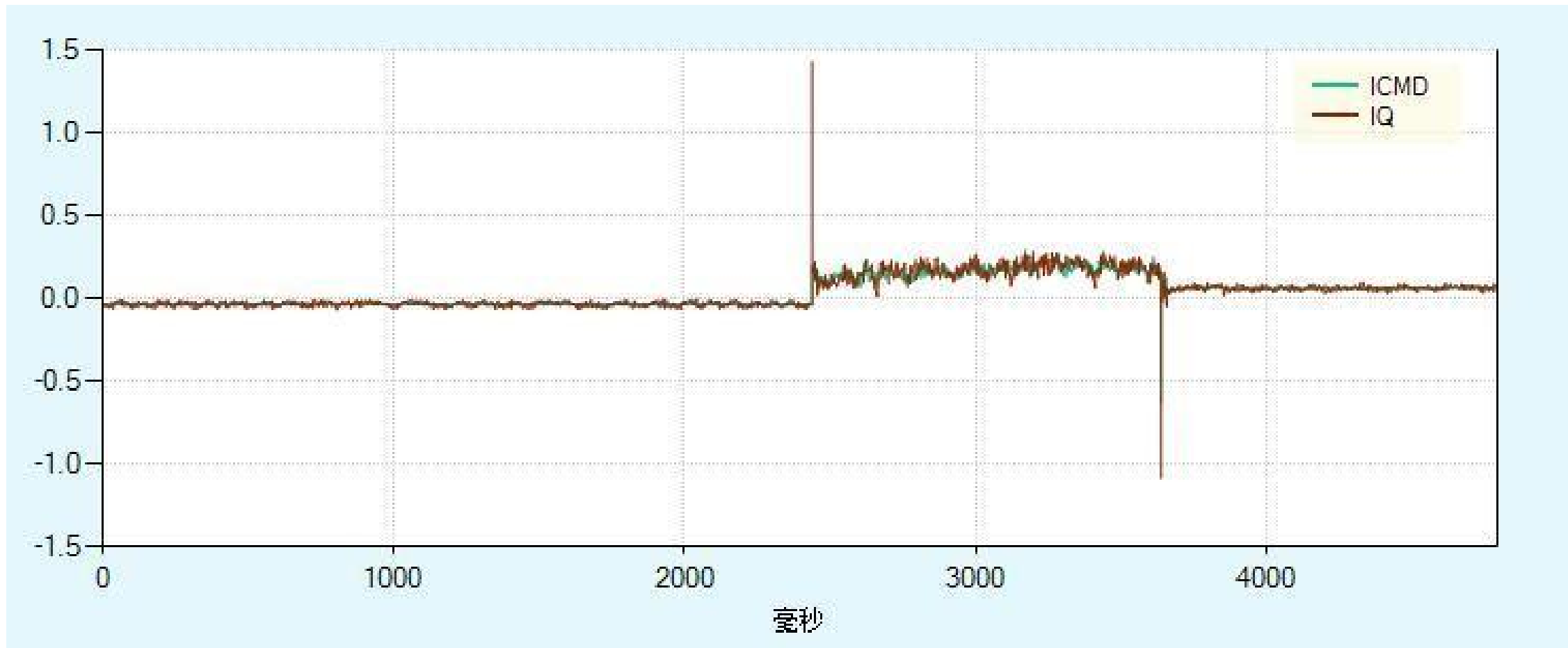


图 16 电流环：ICMD（给定电流）和 IQ（实际转矩电流）

由电流环图像可以看出，实际转矩电流和给定电流十分接近且波动大。

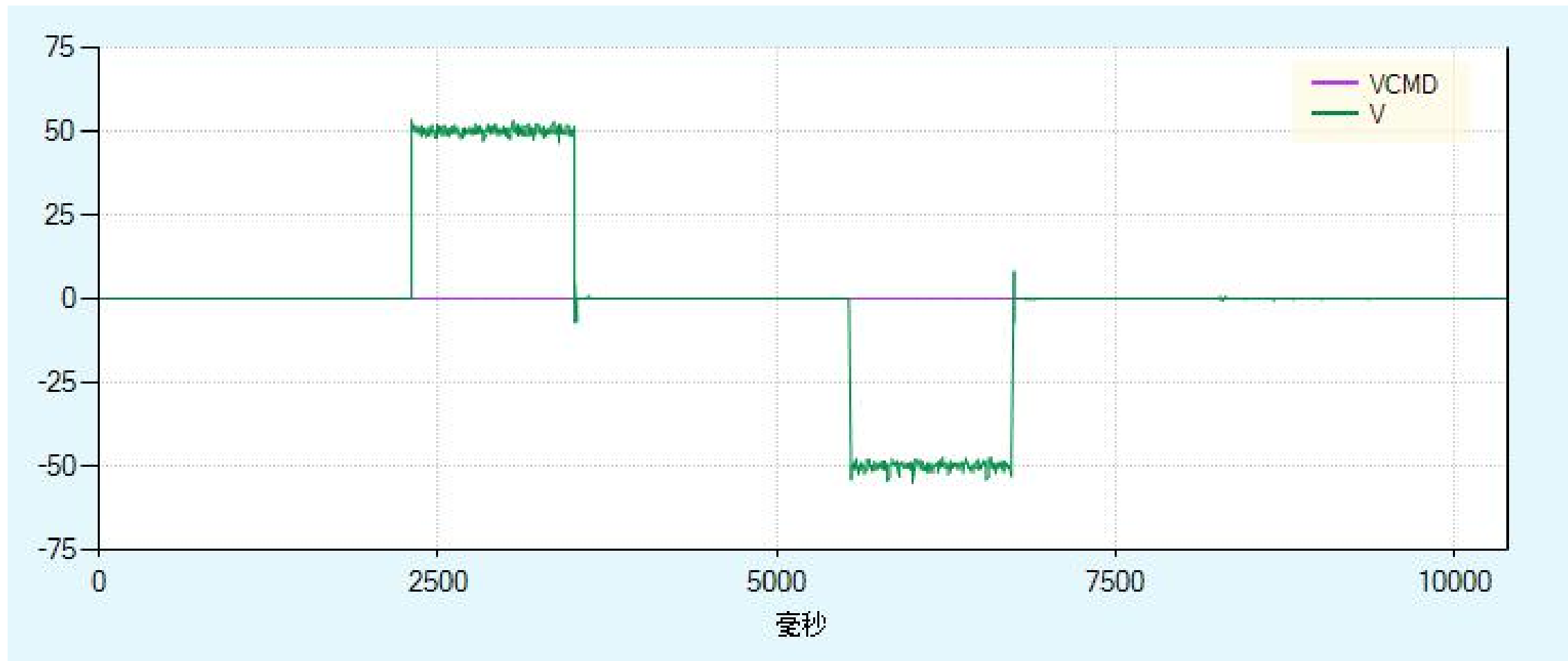


图 17 速度环：VCMD（给定速度）和 V（实际转速）



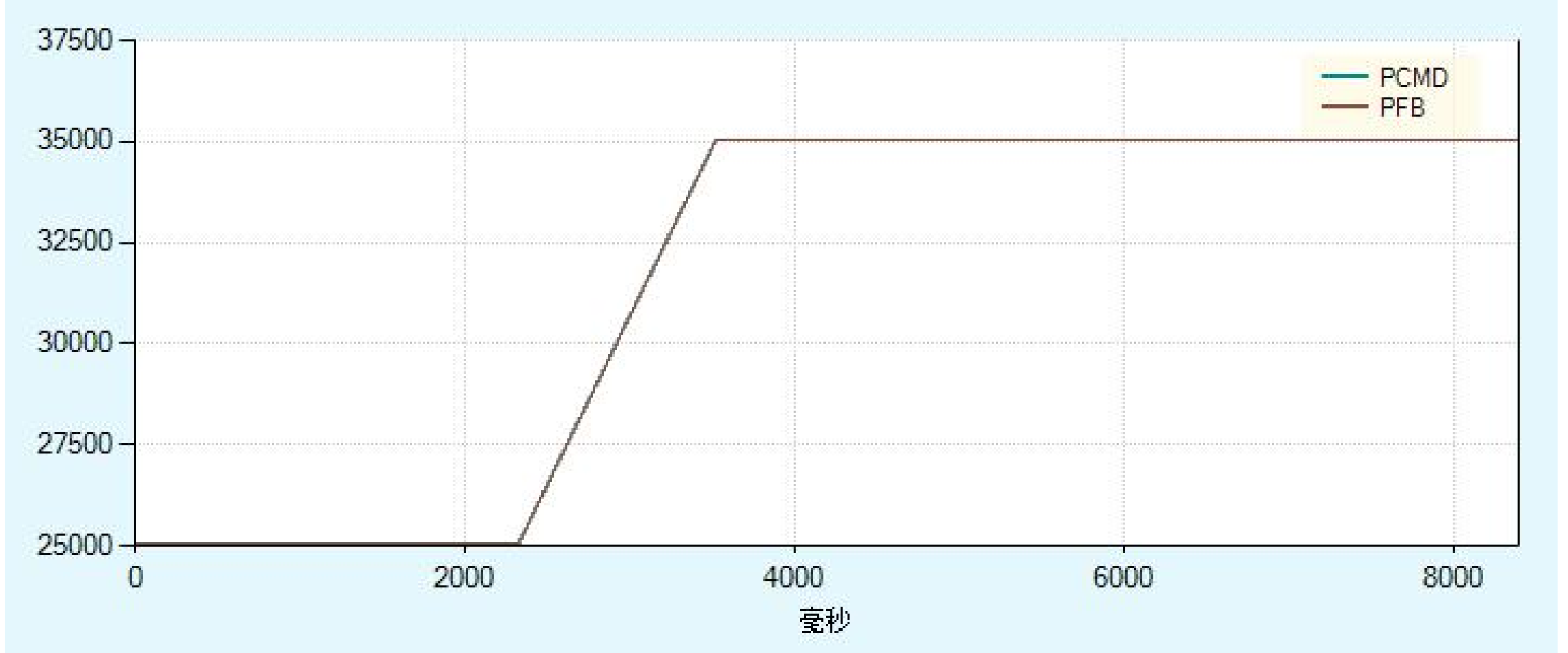


图 18 位置环：PCMD（给定位置）和 PFB（实际位置）

由图像可以看出，给定位置和实际位置十分接近，伺服电机位置伺服性能良好。

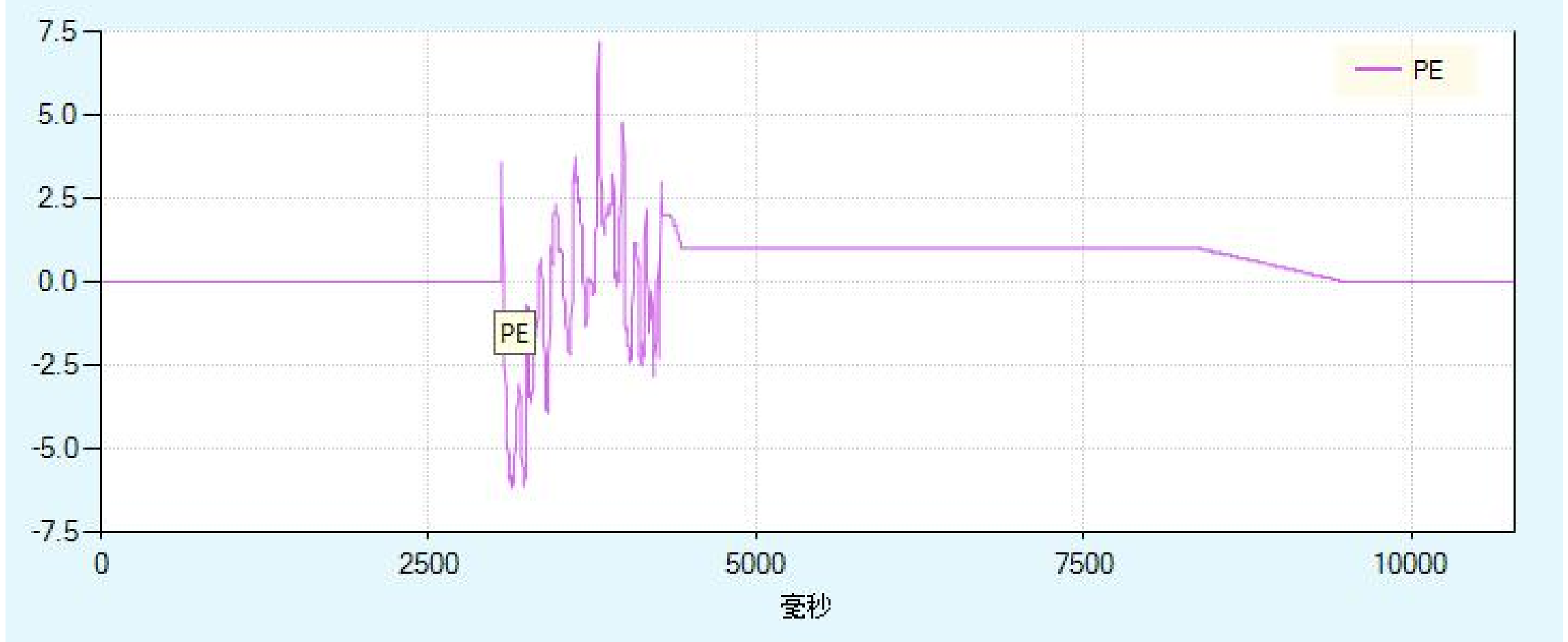


图 19 位置环：PE（位置误差）

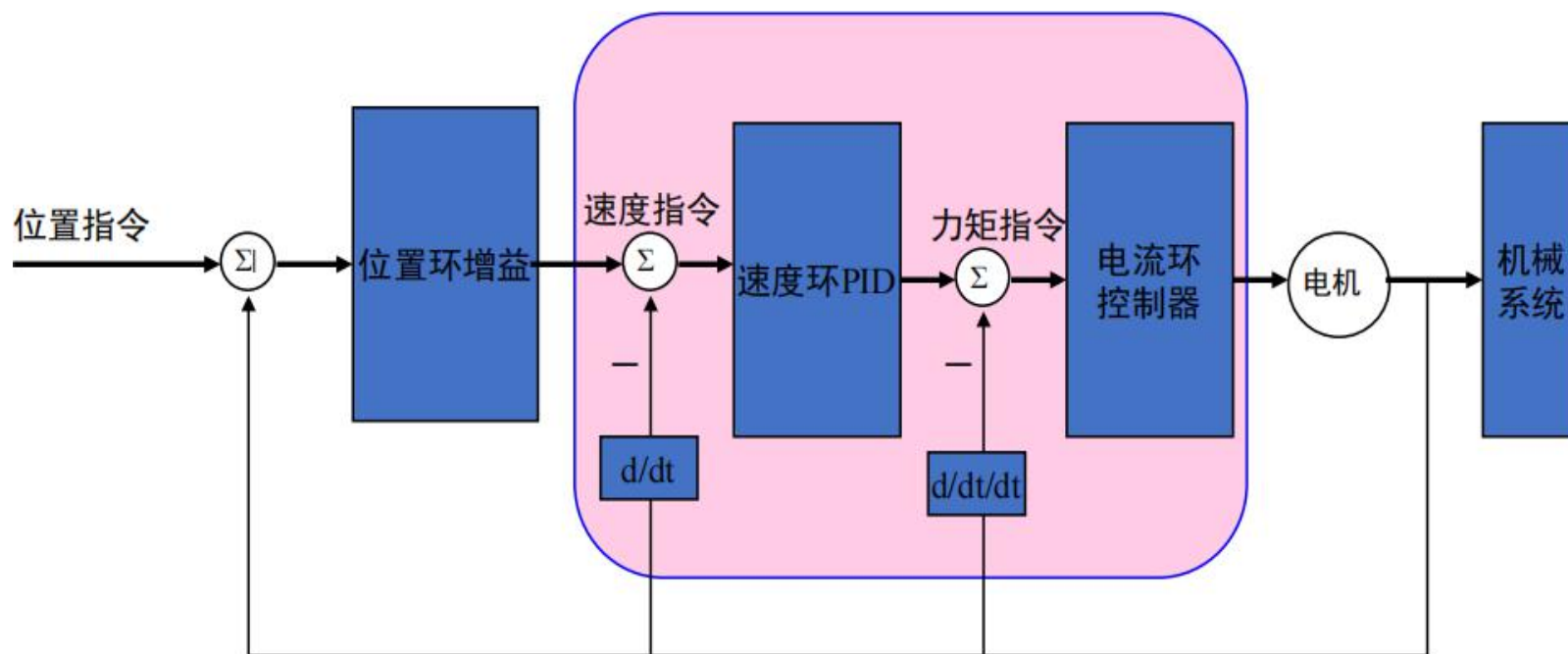
开始匀加速时：角度误差为  $7.5 \times 2.16' = 16.2$  角分

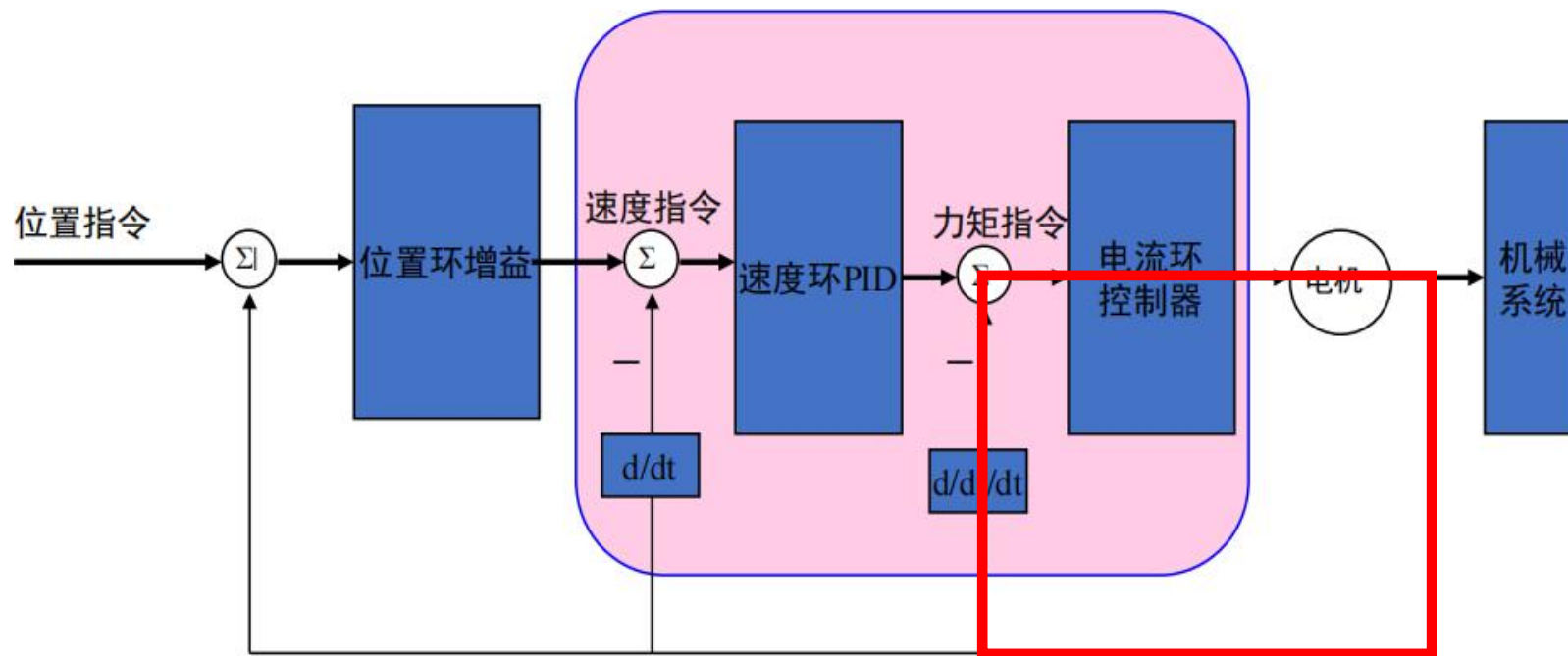
最终稳定在一个脉冲，稳定匀加速时：角度误差为  $1 \times 2.16' = 2.16$  角分

# 设计 3：电机调试与控制系统设计

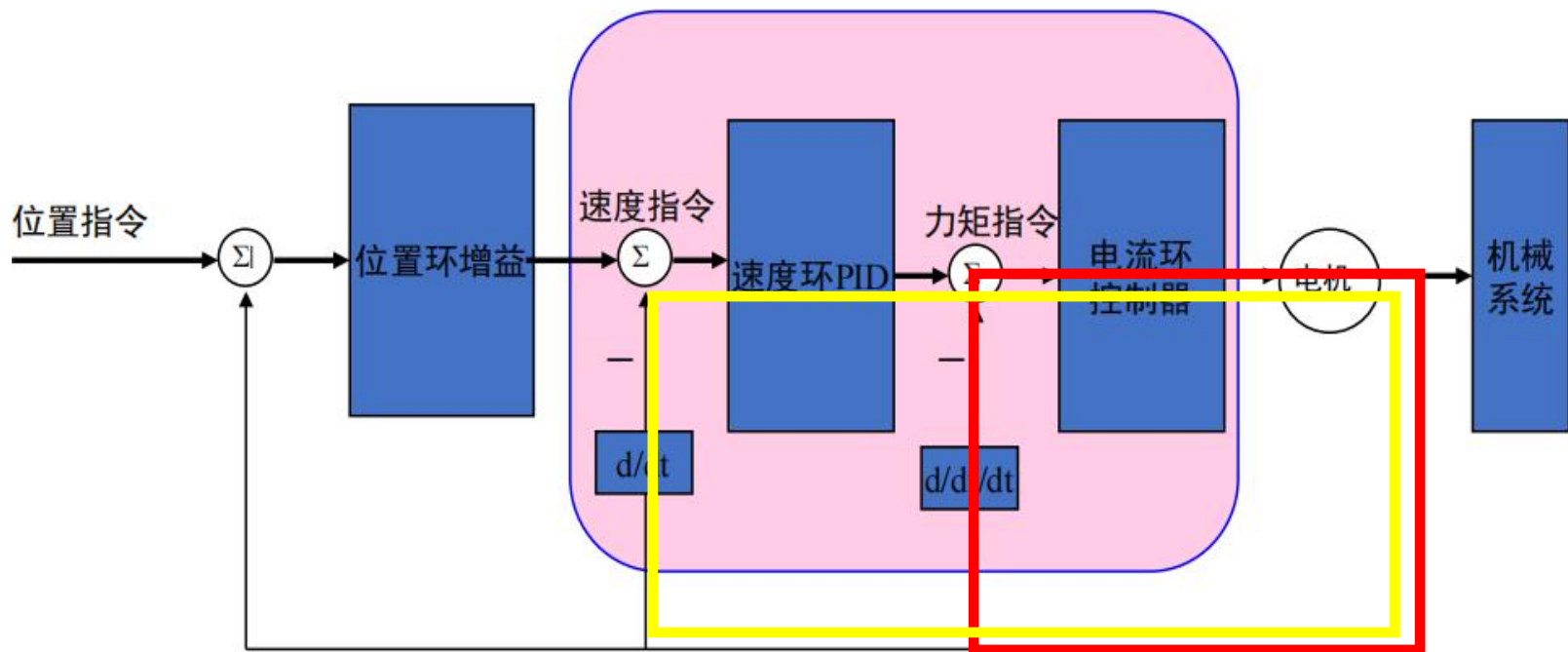
## 4.4.1 电机驱动三个环路的原理及功能

伺服一般为三个环控制，所谓三环就是 3 个闭环负反馈 PID 调节系统。三种控制模式的系统结构图如图所示。



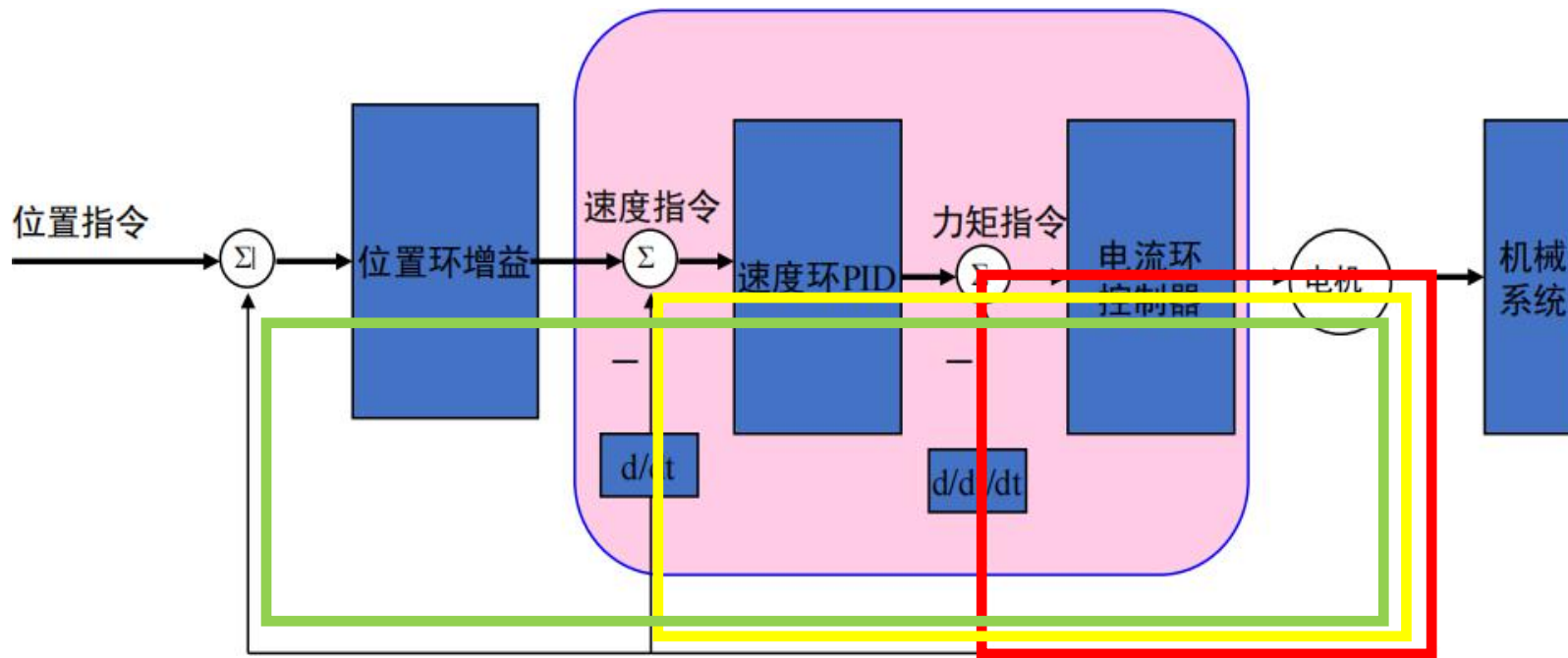


① 电流环为三环最内环，电流环完全在伺服驱动器内部进行，通过电流传感器检测驱动器给电机的各相的输出电流，负反馈给电流的设定进行 PID 调节，从而达到输出电流尽量接近等于设定电流，电流环就是控制电机转矩的，所以在转矩模式下驱动器运算最小，动态响应最快。



②速度环是次外环，通过检测的伺服电机编码器的信号进行负反馈 PID 调节，它的内 PID 输出直接就是电流环的设定，所以速度环控制时就包含了速度环和电流环，（任何模式都必须使用电流环，

电流环是控制的根本，在速度与位置控制的同时系统实际也在进行电流(转矩)的控制以达到速度和



③位置环为最外环，它是位置给定与调节环节，它的环内 PID 输出直接就是速度环的设定。其反馈信号可取自电机编码器，也可取自最终负载，需根据实际情况确定。由于位置环内部输出的是速度环的设定，位置控制模式下系统进行了所有三个环的运算，此时的系统运算量最大，动态响应速度最慢。

综上，电流环控制电机转矩（对应角加速度 $\alpha$ ），电流环和速度环控制速度，三环联合控制位置。

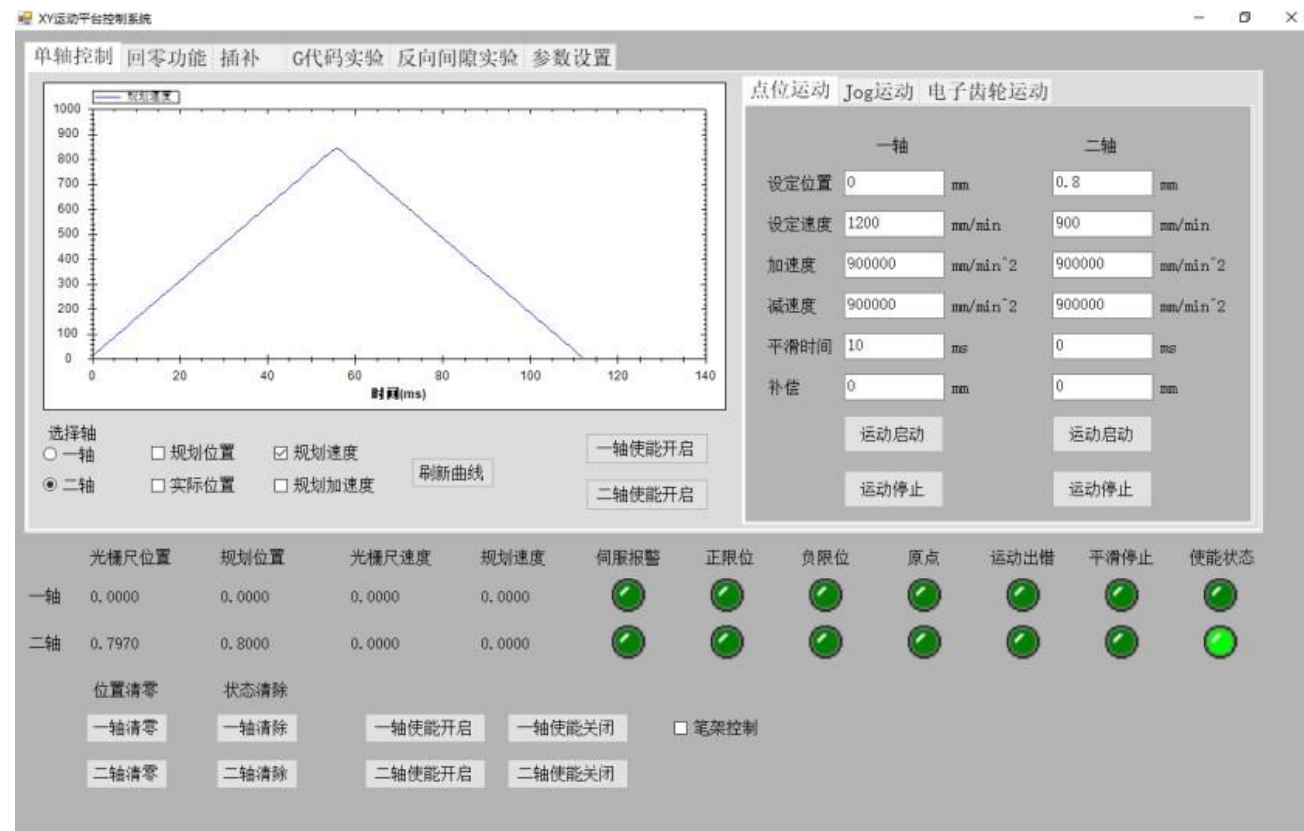
# 4.4.2 伺服电机基本的运动规划控制

使用已有的平台控制软件（XY 平台运动控制系统），测试读取电机指令曲线（位置指令）和运动曲线（规划位置，规划速度，规划加速度）

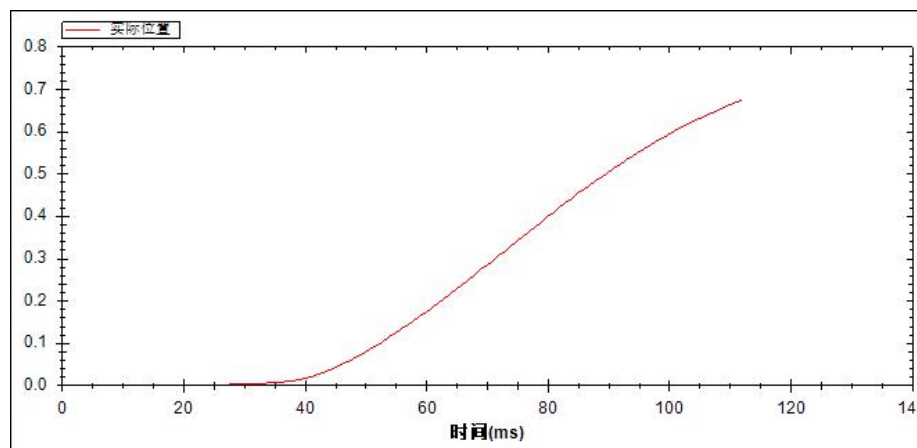
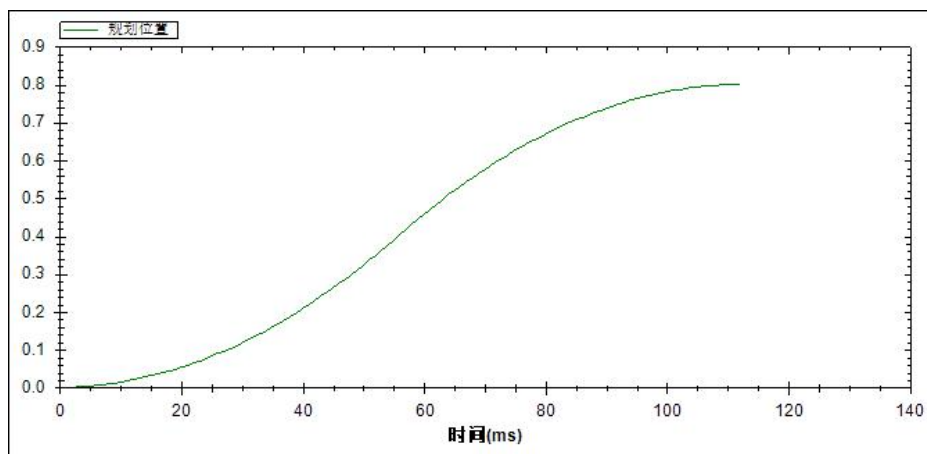
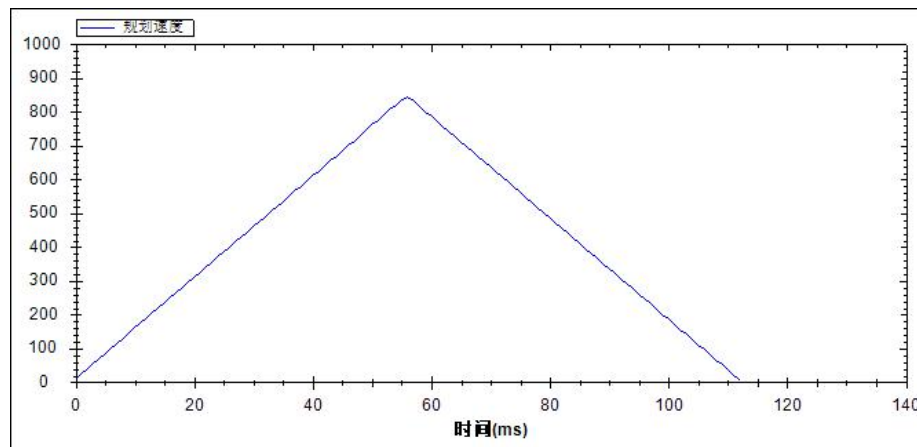
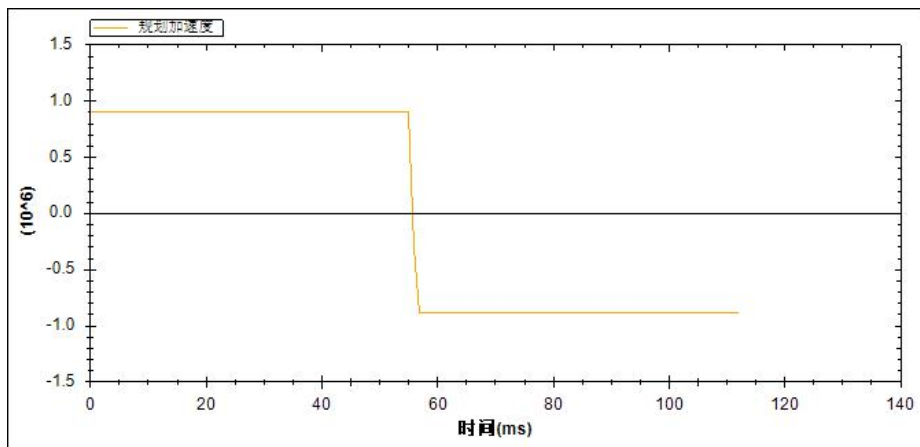
## ①三角形规划

参数设置如下：设定位置 0.8mm，设定速度 900mm/min，加、减

速度  $900000\text{mm}/\text{min}^2$ ，平滑 时间 45ms





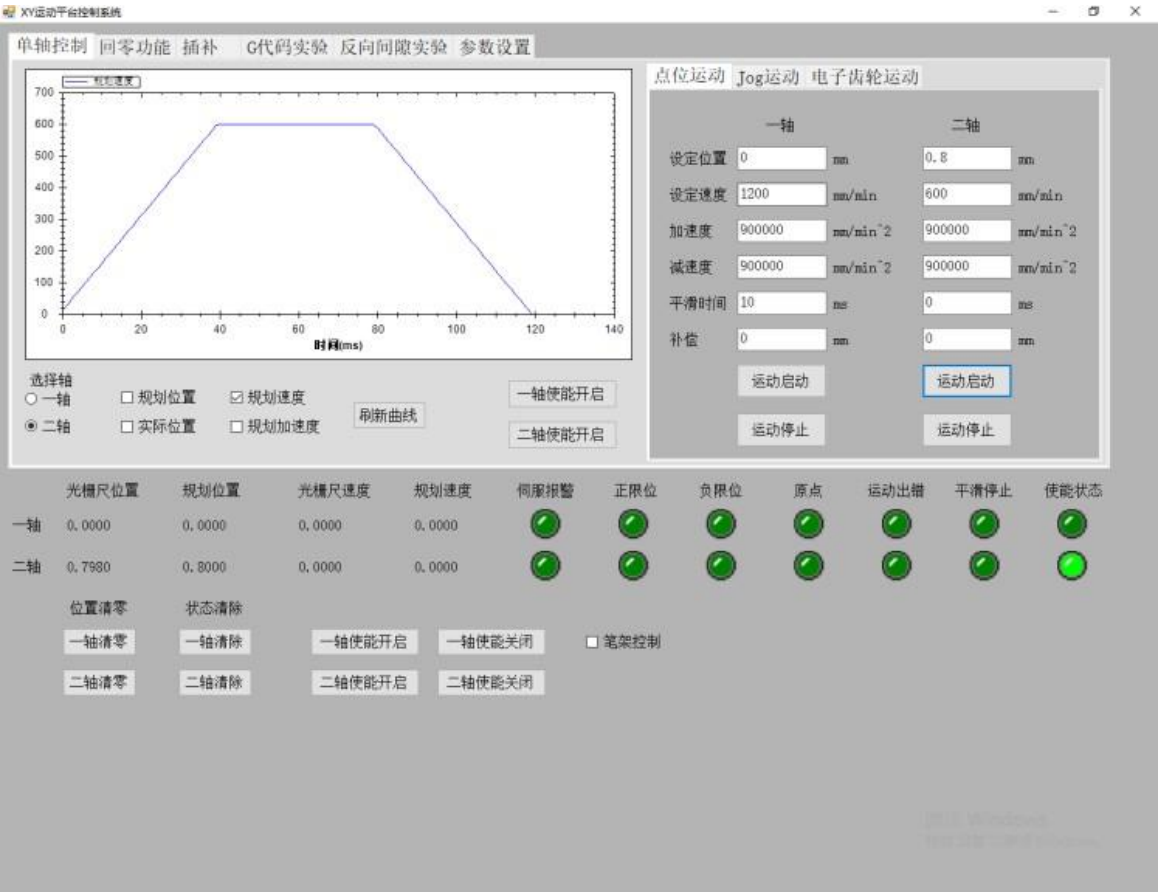


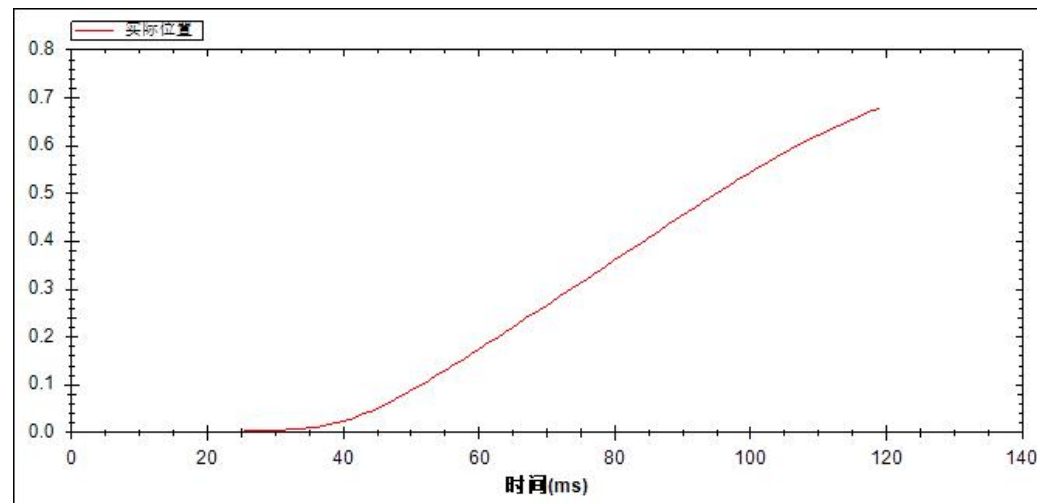
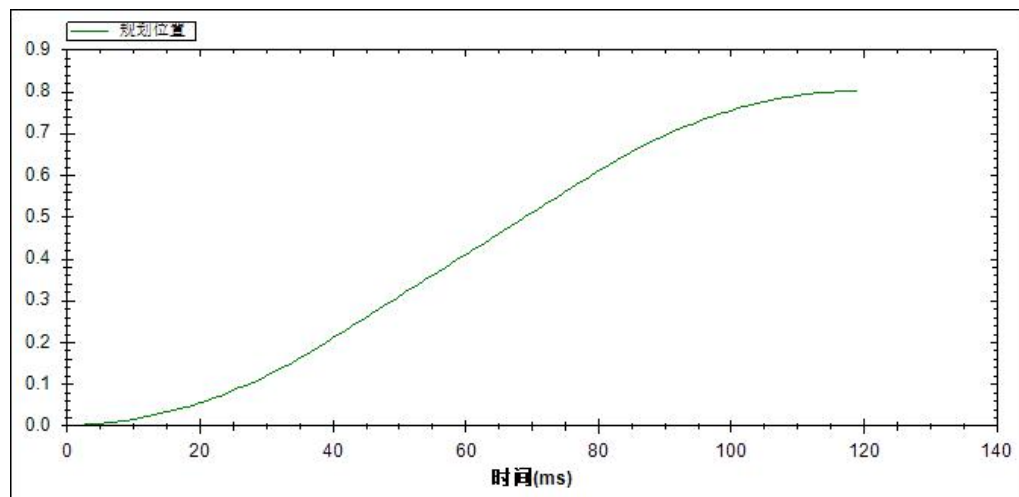
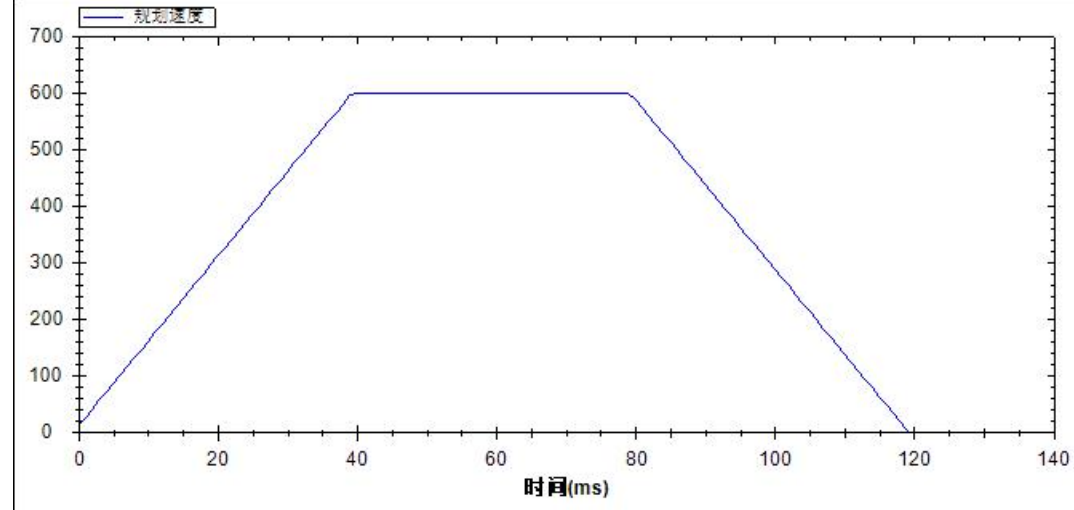
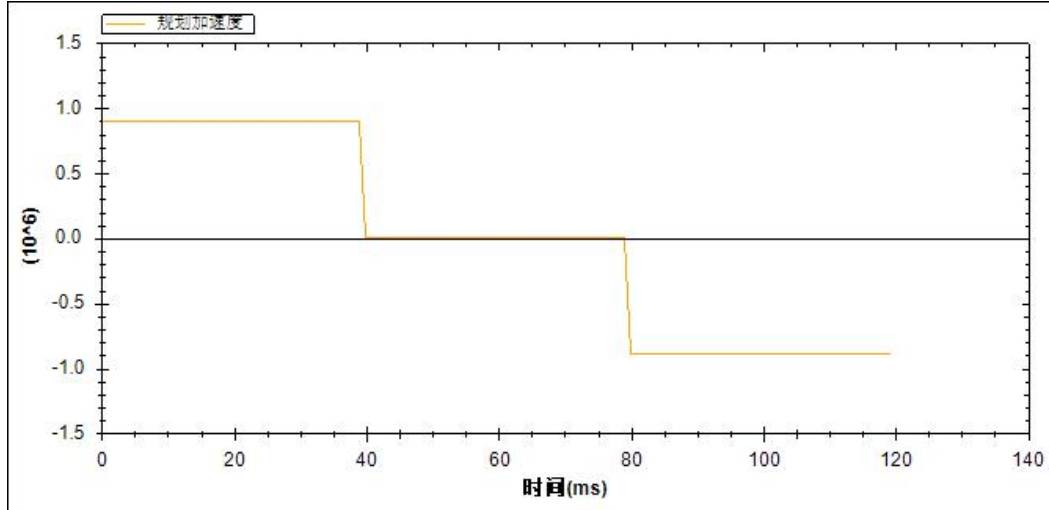
由实验结果，可以看出速度曲线呈现三角形，由于速度设定较大，规定位移内无法达到设定速度；由于一直在加减速，效率最高，用时 112.5ms

②梯形规划

参数设置如下：设定位置 0.8mm，设定速度 600mm/min，加、减速度 900000mm/min<sup>2</sup>，平滑

时间 0ms

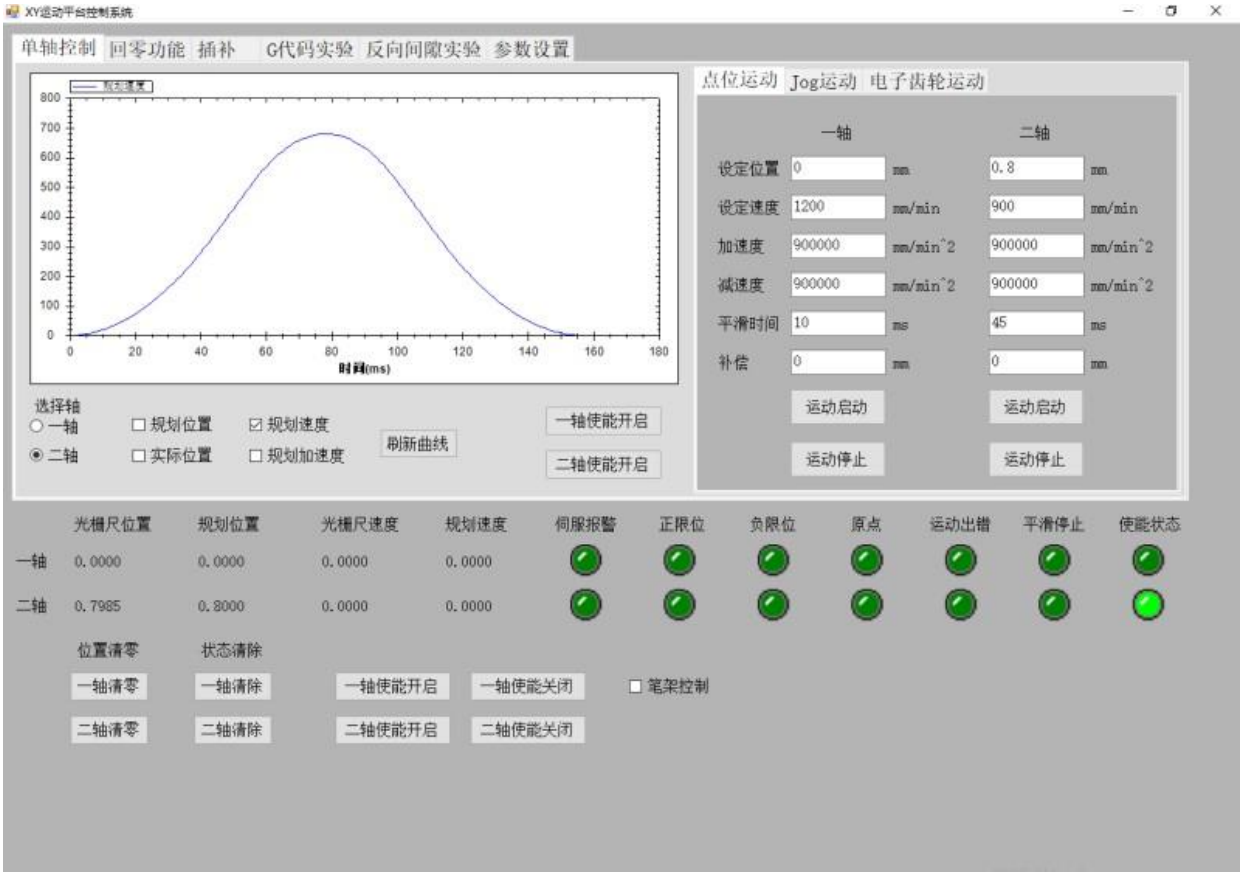


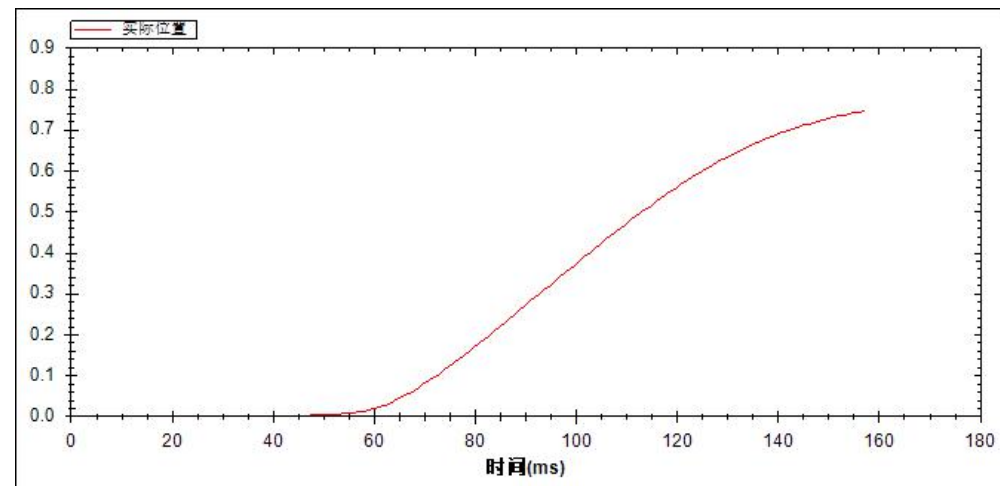
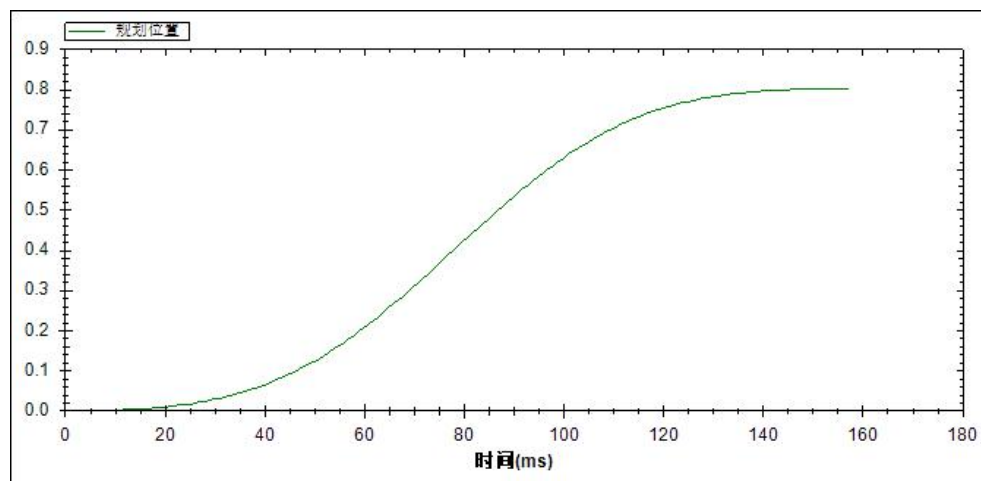
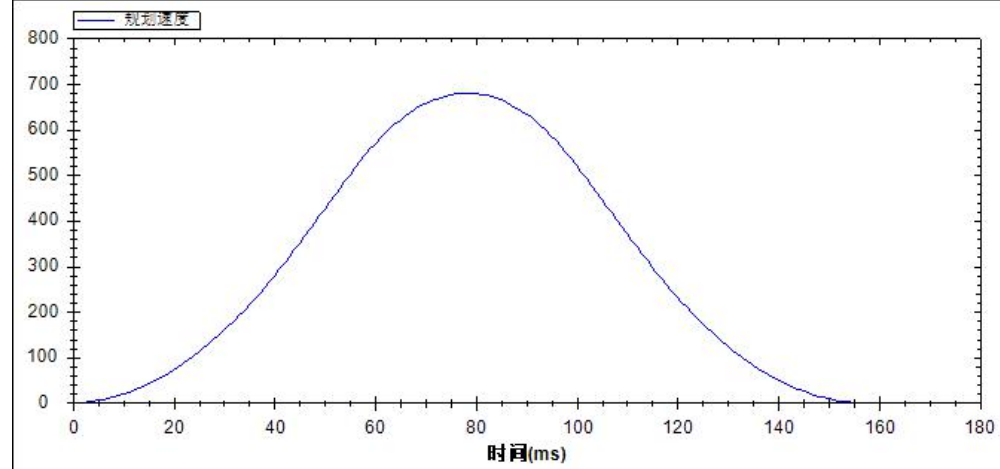
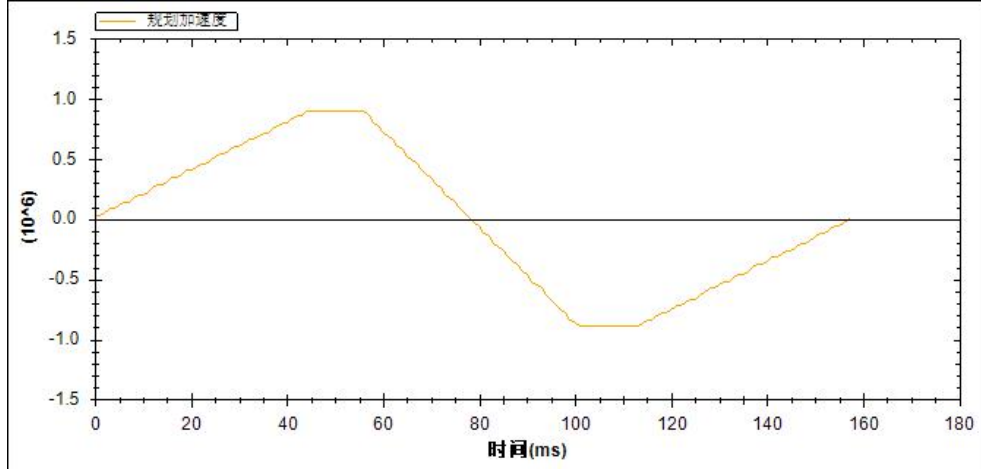


由实验结果，可以看出速度曲线呈现梯形，由于速度设定较小，规定位移内可以达到设定速度；最大速度较小，效率较低，用时 120ms

③S 型规划

参数设置如下：设定位置 0.8mm，设定速度 900mm/min，加、减速度 900000mm/min<sup>2</sup>，平滑时间 45ms





由实验结果，可以看出速度曲线呈现平滑 S 形，加减速时加速度不会突变，是一个连续变化的过程；由于加速加速度和减速加速度连续变化，故效率更低，用时 155ms

综上 三角形 梯形 S 形同一位移用时分别为  $t_1=112.5\text{ms}$ ,  $t_2=120\text{ms}$ ,  $t_3=155\text{ms}$ 。

$t_1 < t_2 < t_3$ , 可知效率: 三角形 > 梯形 > S 形

①三角形速度规划: 转矩有正突变到负的过程, 有柔性冲击, 对电机损害较大。

②梯形速度规划: 转矩存在正突变为 0, 0 突变为负的过程。存在柔性冲击, 但较三角形速度规划较小。但仍会对电机造成损伤。

③S 型速度规划: 转矩变化连续 (即加速度变化连续), 对电机没有损伤。且平稳控制性能好。缺点是效率低, 用时长, 加减速慢。

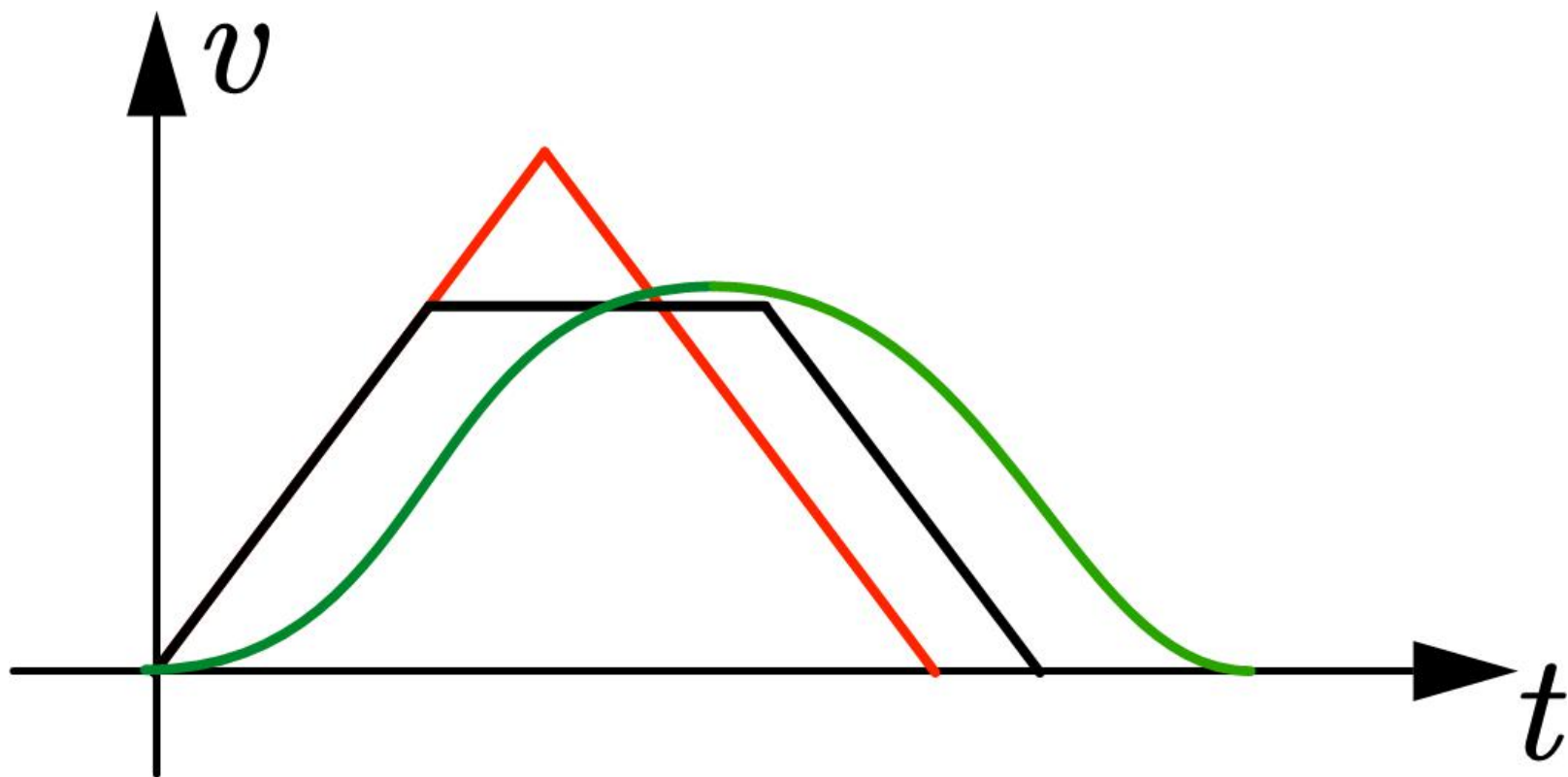


图 36 v-t 运动图像

由数学知识和速度曲线可以证明，在最大加速度一定的情况下，走过相同位移（即包围面积），所用时间：三角形<梯形<S形；

效率：三角形>梯形>S形；

对电机的损害：三角形>梯形>S形。

# 总结

## 1.设计内容结论

本课程设计以哈尔滨工业大学（深圳）运动控制实验室的 XY 平台交流伺服电机运动系统为研究 对象， 认识了典型 XY 平台电机控制系统的组成、功能与技术参数，根据电机学基础知识从电机扭 矩、转动惯量、编码器当量等多个角度验证了该系统设计的合理性。对已调试好的伺服电机读取了其 电机指令曲线、运动曲线等典型曲线，在此基础上进行了运动规划控制。



## 2.课程体会

通过课程的学习，我们对《自动控制理论 A》、《自动控制实践 A》课程所介绍的内容有了更直观、更深入的理解，掌握了典型运动控制系统的一般性分析、设计、核算方法。

## 六、参考文献（资料）

- [1] 梅晓榕, 柏桂珍, 张卯瑞. 自动控制元件及线路（第五版）. 科学出版社. 2013
- [2] 顾绳谷. 电机及拖动基础（第四版）. 机械工业出版社. 2007
- [3] 池海红, 单蔓红, 王显峰. 自动控制元件（第二版）. 清华大学出版社. 2015
- [4] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术. 机械工业出版社. 2009

敬请老师批评指正！