



哈爾濱工業大學 (深圳)
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

《自动控制实践 A》 课程设计报告

开课学期: 2021 学年秋季学期
课程名称: 自动控制实践 A 课程设计
实验时间: 1.4-1.7 地点: K320
学生专业: 自动化类
学生学号: 180610112 190410102
学生姓名: 马光远 方尧
评阅教师: 陈力
报告成绩: _____

实验与创新实践教育中心印制

一、任务书

序号	教学内容	教学要求	学时	教学方式	对应课程目标
1	设计 1: 电机选型计算与设计	<p>1. 利用运动控制实验室现有设备开展, 总共 15 套:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ XY 平台(伺服电机 10 套), ✓ XY 平台(直线电机 5 套), ✓ 每 2 人一组, 选择一种设备。 <p>1. 认识已有 XY 平台系统的电机 (如交流伺服或直线电机等), 控制器, 驱动器, 传感器, 描述电机控制系统的组成, 并画出控制系统框图并解释其功能与技术参数;</p> <p>2. 测绘并用 Solidworks 绘制 XY 平台机械部分 (只需要绘制上轴模组), 利用三维模型反算到电机端的当量转动惯量, 根据平台精度要求 (正负 20um, 分辨率<5um) 以及速度 (500mm/s) 与加速度 (>1g), 计算运动平台所需要的电机扭矩、转动惯量、编码器当量, 从理论上分析与验证运动平台所选择的电机是否合理。</p>	1 周	课程设计	课程目标 3
2	设计 2: 电机控制与驱动电路设计, 运动曲线测试。	<p>1. 结合已有控制器、驱动器、以及传感反馈测量实物, 分析电机、控制卡与驱动器的主要信号流通路径与当量变换关系, 绘制位置模式下系统的电气连接图; 查询资料并绘制出电机驱动电路, 包括: DSP、功放、反馈信号采集等硬件原理图。</p> <p>2. 利用已有的驱动器调试软件, 测试并读取电机指令曲线 (如位置指令) 与运动曲线 (位置、速度及驱动电流等) (<u>课堂检查</u>)。</p>			课程目标 3
3	设计 3: 电机调试与控制系统设计	<p>1. 基于现有 XY 平台电机控制系统, 调试其控制参数, 查询资料给出电机驱动三个环路的原理及功能;</p> <p>2. 对已调试好的伺服电机进行基本的运动规划控制 (<u>课堂检查</u>);</p> <p>3. 给出以上测试数据, 掌握电机控制系统实验方法和数据处理方法。</p>			课程目标 3

二、摘要和关键词

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测试了其电机指令曲线等典型运动曲线，在此基础上进行了运动规划控制。

关键词：电机、当量核算、驱动电路、运动规划控制

三、目录

目录	
一、任务书	2
二、摘要和关键词	3
三、目录	3
四、正文	4
4.1 课程设计背景与意义	4
4.2 设计 1：电机选型计算与设计	5
4.2.1 XY 运动控制平台组成	5
4.3 设计 2：电机控制与驱动电路设计，运动曲线测试	14
4.3.1 控制卡与驱动器的主要信号流通路径	14
4.3.2 当量变换关系计算	14
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	15
4.3.4 测试并读取电机指令曲线	17
4.4 设计 3：电机调试与控制系统设计	19
4.4.1 电机驱动三个环路的原理及功能	19
4.4.2 伺服电机基本的运动规划控制	20
五、总结	24
5.1 设计内容结论	24
5.2 课程体会	24
六、参考文献（资料）	24

四、正文

4.1 课程设计背景与意义

本课程《自动控制实践 A 课程设计》是自动化专业核心课《自动控制理论 A》、《自动控制实践 A》的配套实践课，是先前所学《大学物理》、《电路》、《模拟电子技术》、《数字电子技术》等基础课程的集中实践应用。

与之前开设的实验课程作对比，《大学物理实验 I》课程电路部分的实验仅限于对 R、L、C 元件在电路中的作用；《电路实验》注重研究、验证电路基本定律；《模拟电子技术实验》注重研究运算放大器、分立元件的使用规律与作用；《数字电子技术实验》主要研究计数器等小规模集成电路的设计与性质；而本课程《自动控制实践 A 课程设计》主要研究以电机为核心元器件的伺服运动控制系统，同时学习运动控制卡（控制元件）、光栅尺（测量元件）等大规模集成的成熟元件，是上述实验课程的高度集成。

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。

4.2 设计 1：电机选型计算与设计

4.2.1 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，传感器主要由增链式编码器和光栅尺组成。

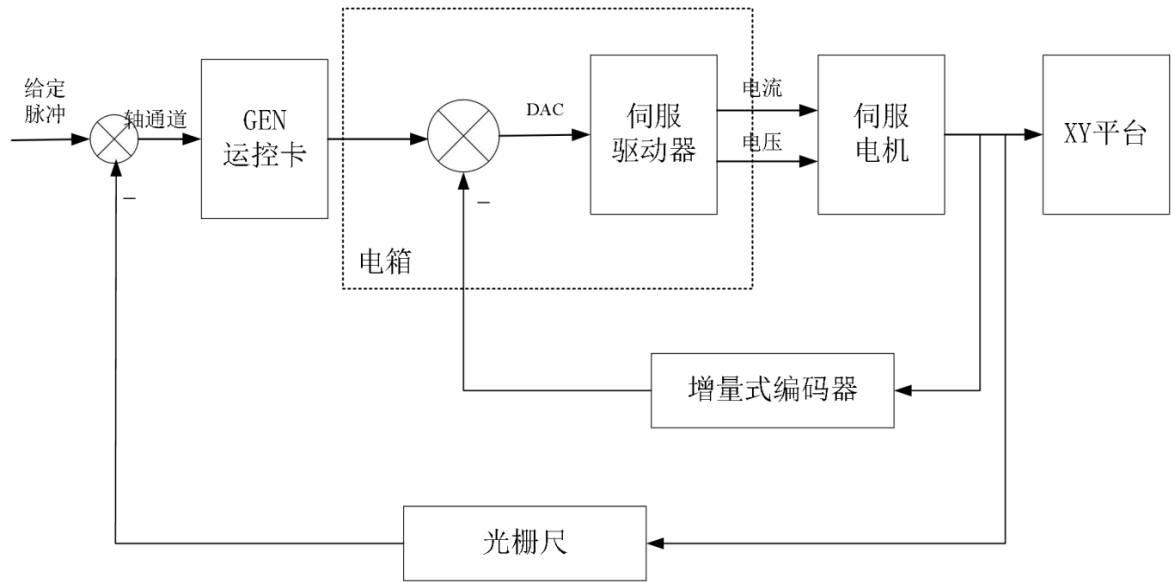


图 1 控制系统框图

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	TS4607111680E200
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·m ²	2.63×10 ⁻⁵	1.9×10 ⁻⁵
Resolver 电机转子惯量	kg·m ²	0.333×10 ⁻⁵	2×10 ⁻⁵
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

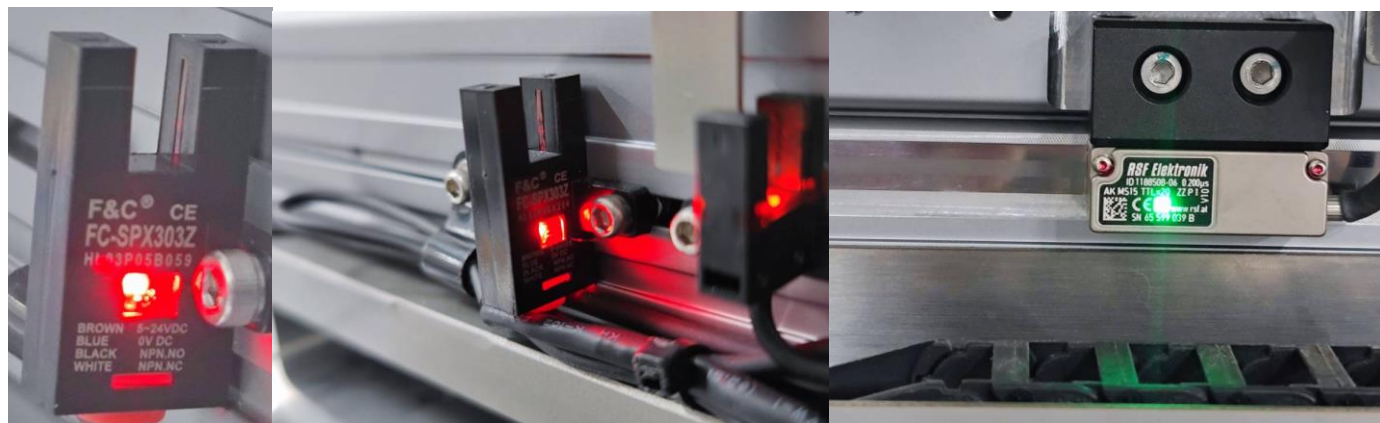


图 2 光栅尺与读数头



图 3 Y 轴安川电机与参数

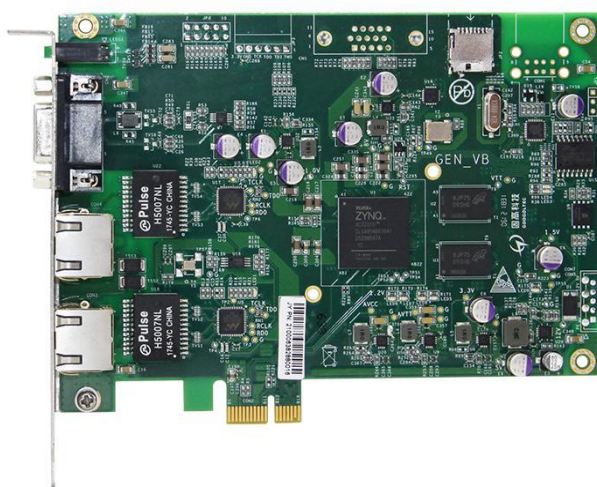


图 4 GEN 运动控制卡

4.2.2 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

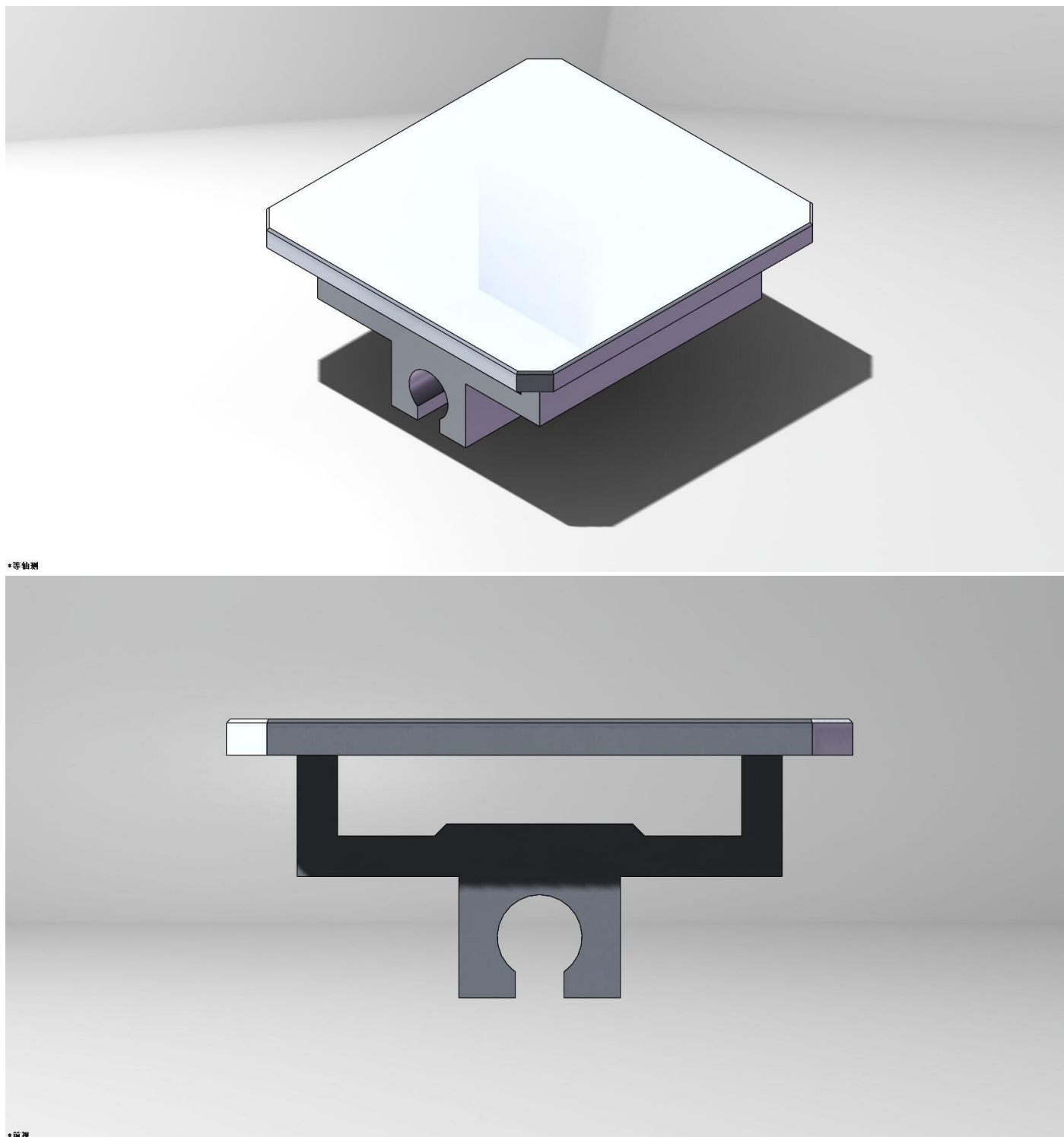


图 5.6 负载平台 Solidworks 模型

负载平台的质量属性

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。

lx = (0.000, 0.000, 1.000) Px = 2614.330

ly = (1.000, 0.000, 0.000) Py = 2761.028

lz = (0.000, 1.000, 0.000) Pz = 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。

Lxx = 2761.028 Lxy = 0.000 Lxz = 0.000

Lyx = 0.000 Lyy = 4335.334 Lyz = 0.000

Lzx = 0.000 Lzy = 0.000 Lzz = 2614.330

惯性张量: (千克 * 平方毫米)

由输出坐标系决定。

lxx = 3542.085 lxy = 0.000 lxz = 0.000

lyx = 0.000 lyy = 4335.334 lyz = 0.000

lzx = 0.000 lzy = 0.000 lzz = 3395.387

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

b. 丝杠

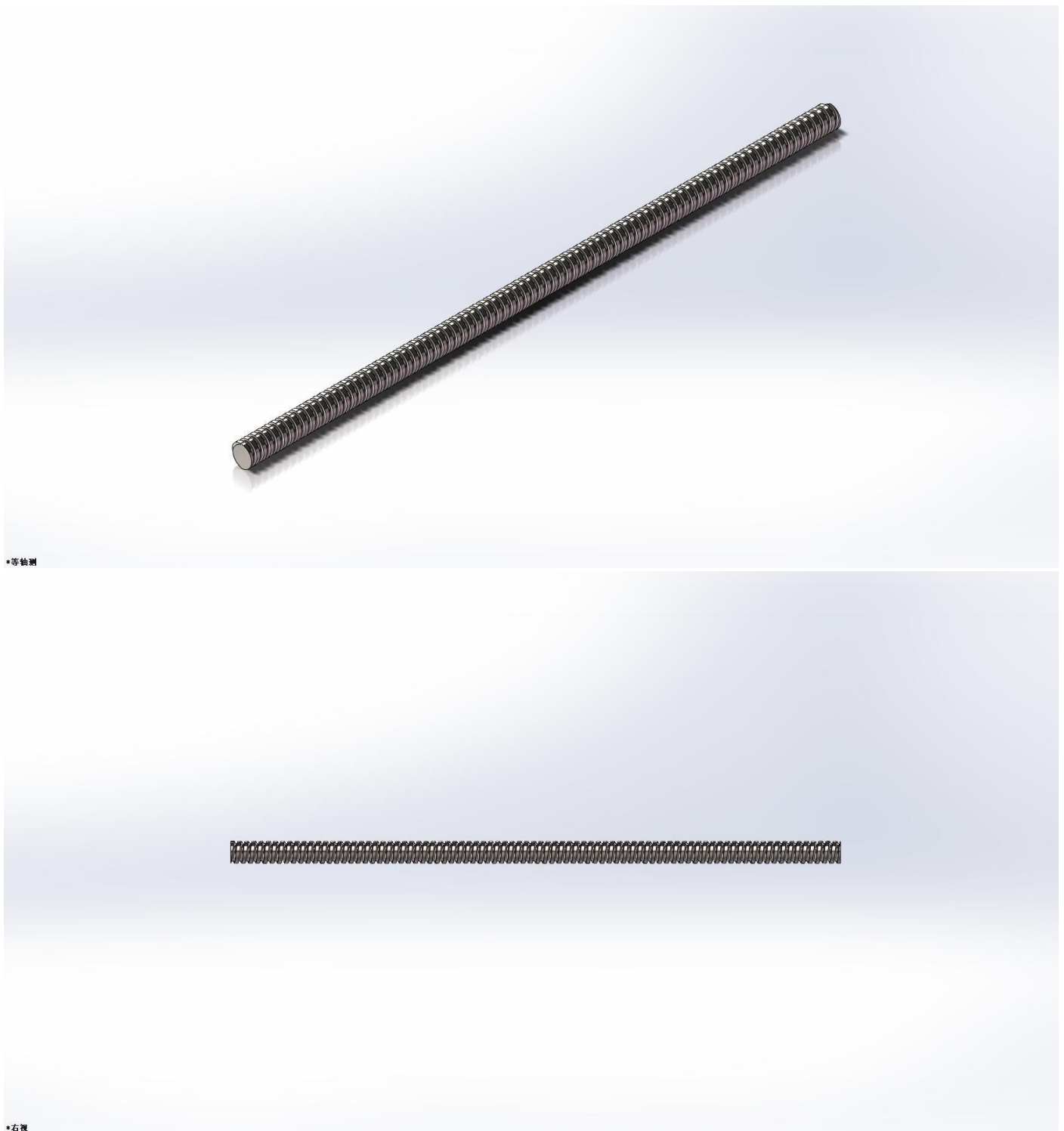


图 8,9 丝杠 Solidworks 模型

丝杠的质量属性

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。

$$I_x = (0.000, 0.000, 1.000) \quad P_x = 12.692$$

$$I_y = (0.707, -0.707, 0.000) \quad P_y = 7551.187$$

$$I_z = (0.707, 0.707, 0.000) \quad P_z = 7551.187$$

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。

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

$$L_{yx} = 0.000 \quad L_{yy} = 7551.186 \quad L_{yz} = 0.363$$

$$L_{zx} = 0.000 \quad L_{zy} = 0.363 \quad L_{zz} = 12.692$$

惯性张量: (千克 * 平方毫米)

由输出坐标系决定。

$$I_{xx} = 30183.958 \quad I_{xy} = 0.000 \quad I_{xz} = 0.027$$

$$I_{yx} = 0.000 \quad I_{yy} = 30183.956 \quad I_{yz} = 0.354$$

$$I_{zx} = 0.027 \quad I_{zy} = 0.354 \quad I_{zz} = 12.692$$

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

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

$$F_L = F_a + m_1 a$$

$$(T + J\epsilon) \cdot 2\pi = F_L t$$

$$F_s = \frac{2\pi(T + J\epsilon)}{t} = m a$$

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，故传动比 $i = 1$ ，传动效率 $\eta = 100\%$ 。代入数据计算得

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

(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

$$\frac{1}{2}m_1 v^2 = \frac{1}{2}J_L \omega^2$$

即有

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

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

$$J_s = P_x = 12.692 kg \cdot mm^2 = 1.2692 \times 10^{-5} kg \cdot m^2$$

c. 电机轴上的总转动惯量

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

(3) 电机轴上的总转矩并校核

首先由丝杆的工作原理，有丝杆转速与工作台直线运动速度的关系

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

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。

(4) 验证惯量匹配

电机转子惯量

$$J_M = 5.960 \times 10^{-5} kg \cdot m^2$$

电机轴转动惯量

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

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。

d. 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 $\pm 5\mu m$ 或 $\pm 15\mu m$ ，故满足 $\pm 20\mu m$ 的使用精度要求。

e. 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 RSF 官

方用户手册可知，该读数头的分辨力为 $0.5\mu m$ ，故满足实验平台 $5\mu m$ 的使用要求。

f. 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 $10000/5 = 2000p/mm$ 。

g. 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。

4.3 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过程

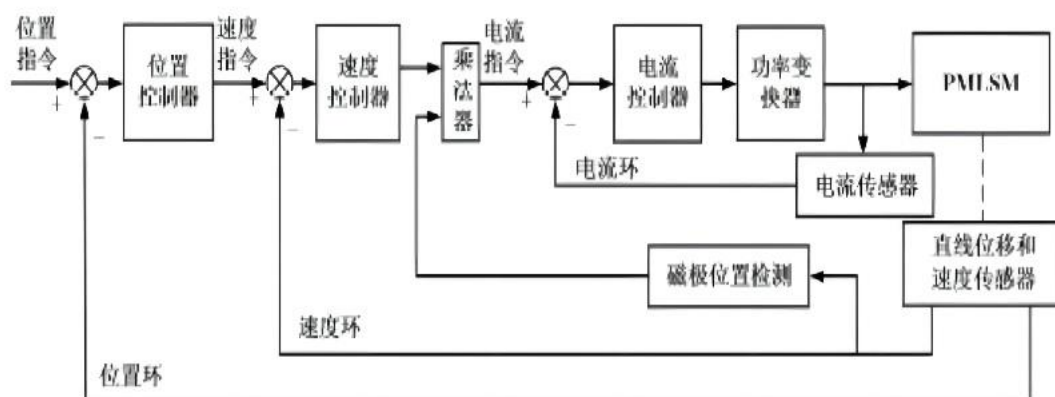


图 12 控制系统框图

主要信号流通过程：

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

实验测得 20000 脉冲对应 2 圈，但是由于目测存在视觉误差，以及电机传动端无明显周向标记，故此方法偶然误差较大。

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

实验测得 20000 脉冲对应 10mm 位移，第一部分已经测得丝杆螺距 $P=5\text{mm}$ ，可以得到对应圈数 $=10\text{mm}/5\text{mm}=2$ 转，与第一种方法目测测得结果符合。

即脉冲与电机转过圈数间存在的当量关系为 10000 脉冲对应 1 转。

可得分辨力为 $360^\circ/10000=0.036^\circ$ 即 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

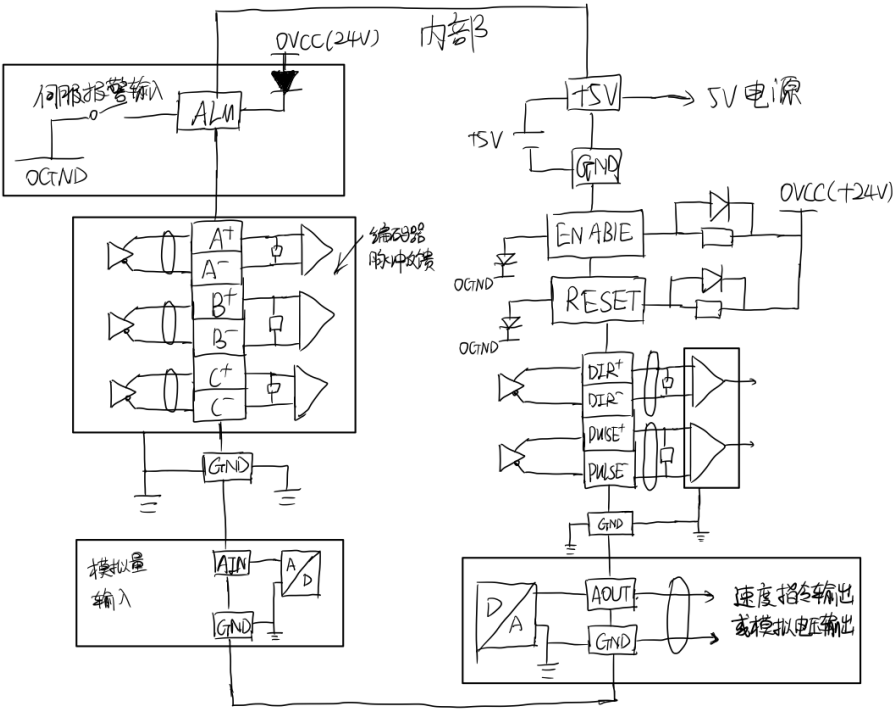


图 13 端子板内部电路结构

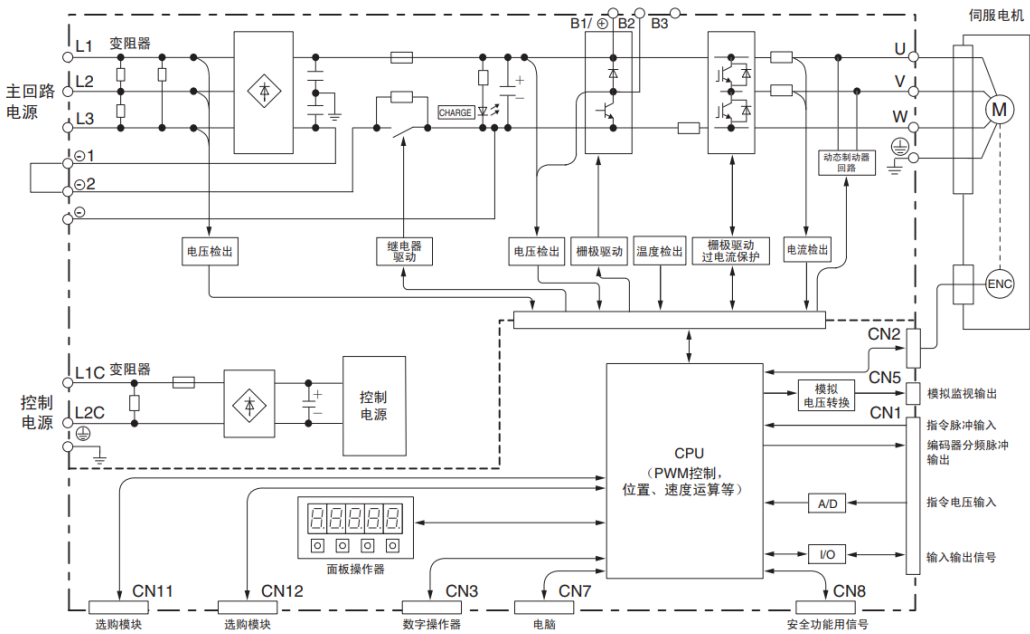


图 14 电机驱动电路

位置控制下电气连接图：

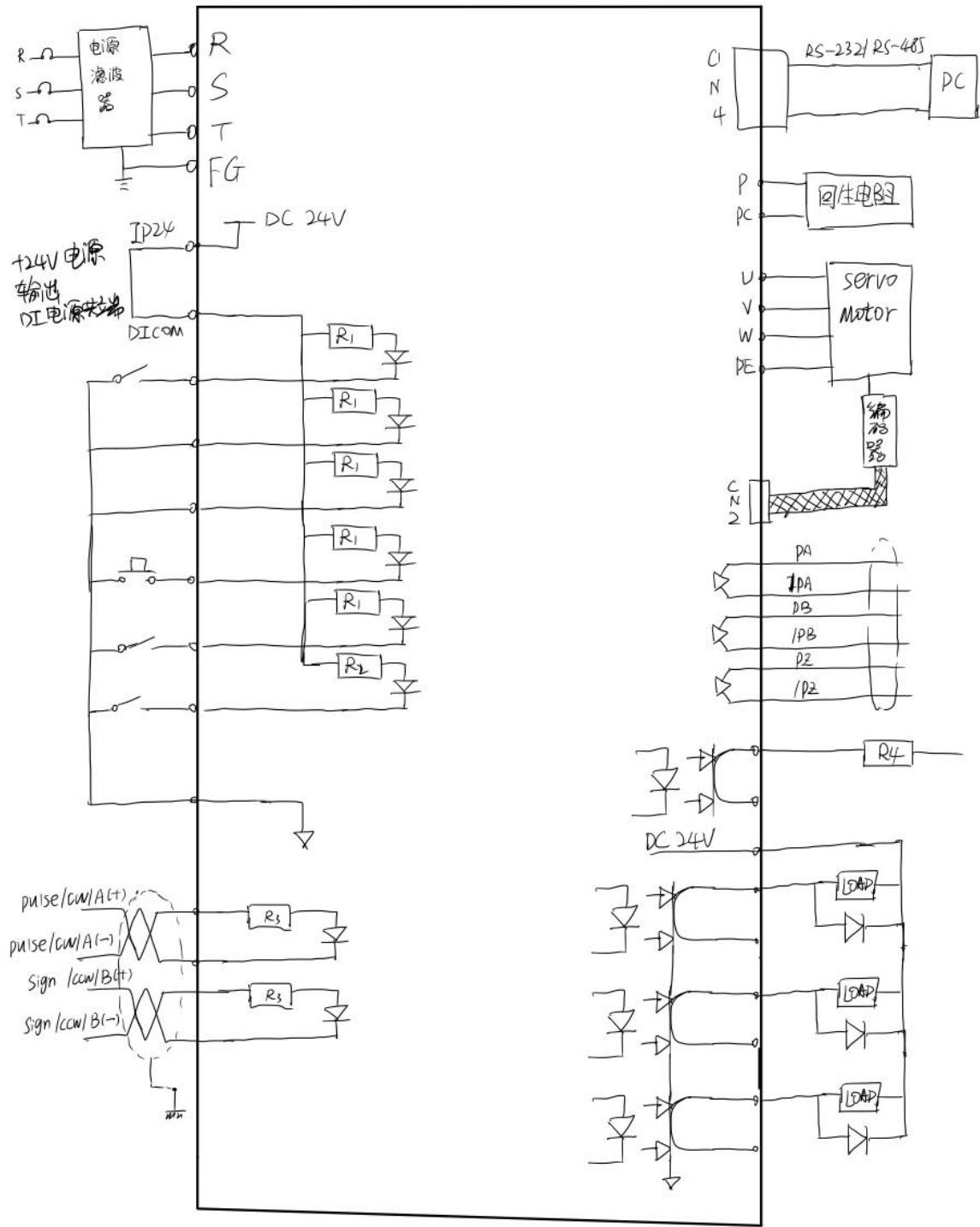


图 15 位置控制下电气连接图

4.3.4 测试并读取电机指令曲线

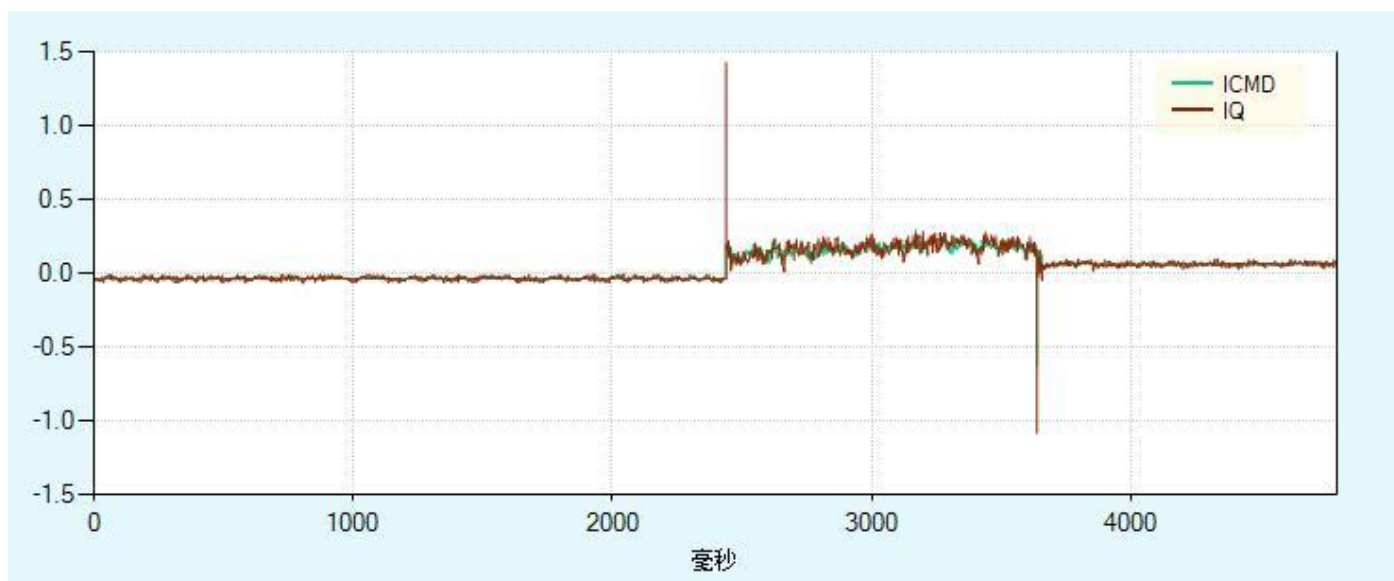


图 16 电流环: ICMD (给定电流) 和 IQ (实际转矩电流)

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。

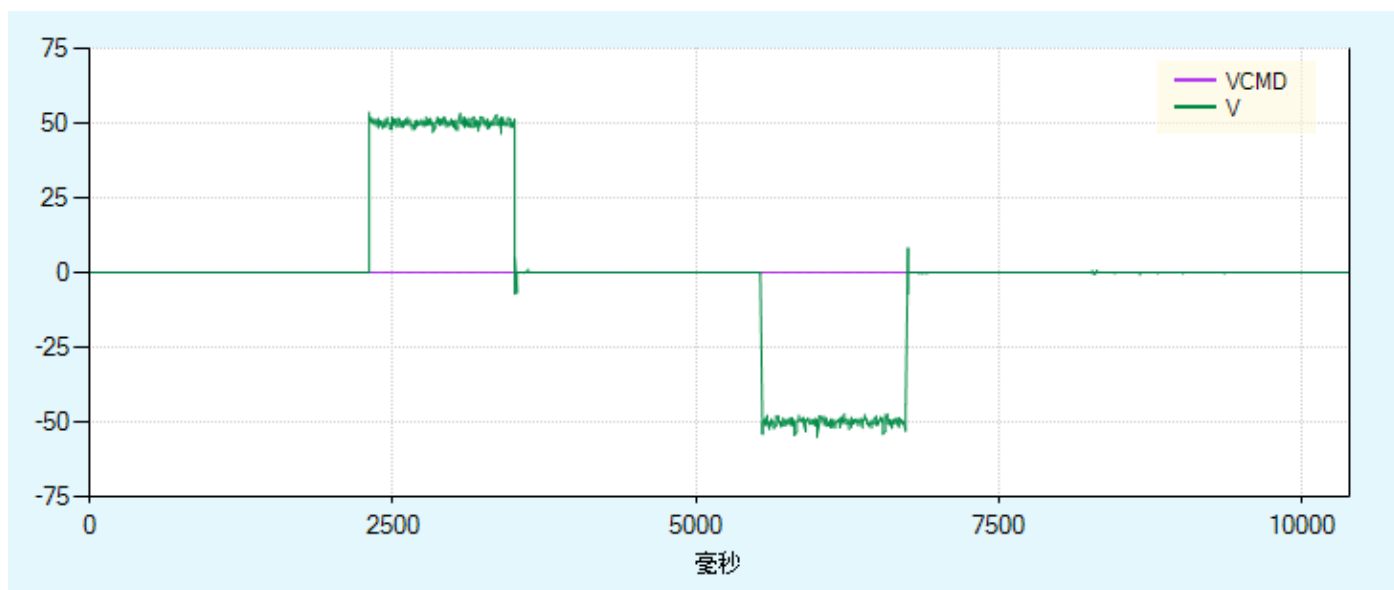


图 17 速度环: VCMD (给定速度) 和 V (实际转速)

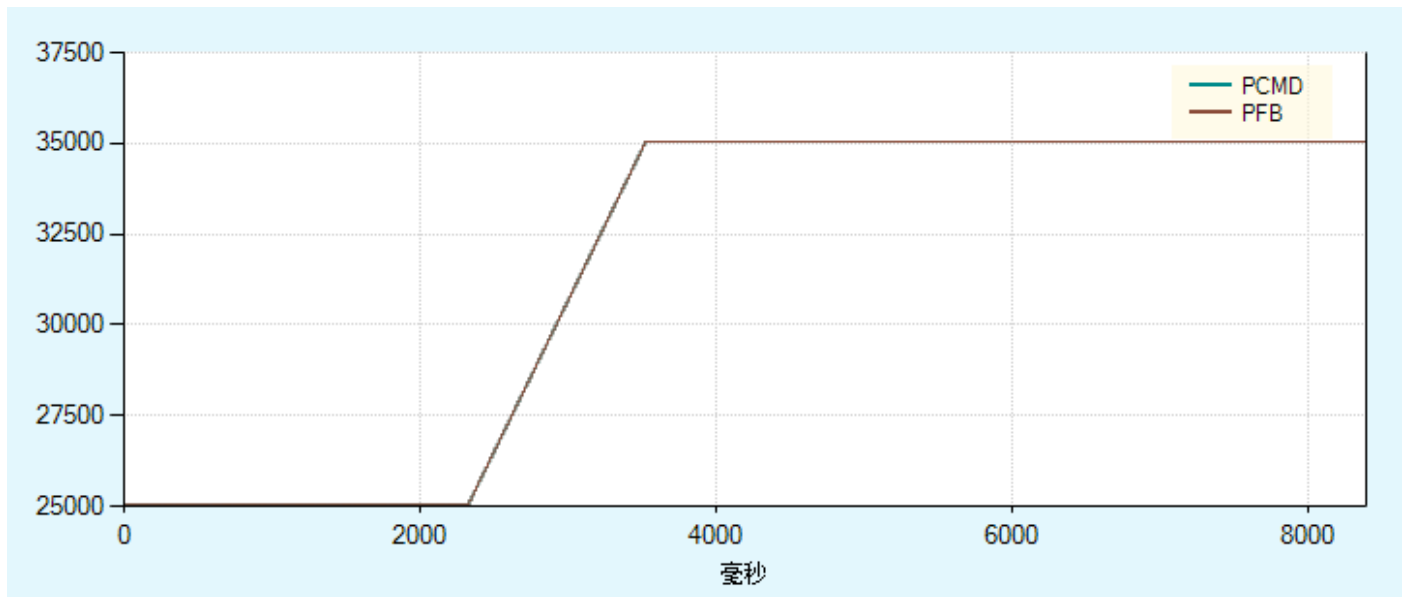


图 18 位置环: PCMD (给定位置) 和 PFB (实际位置)

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。

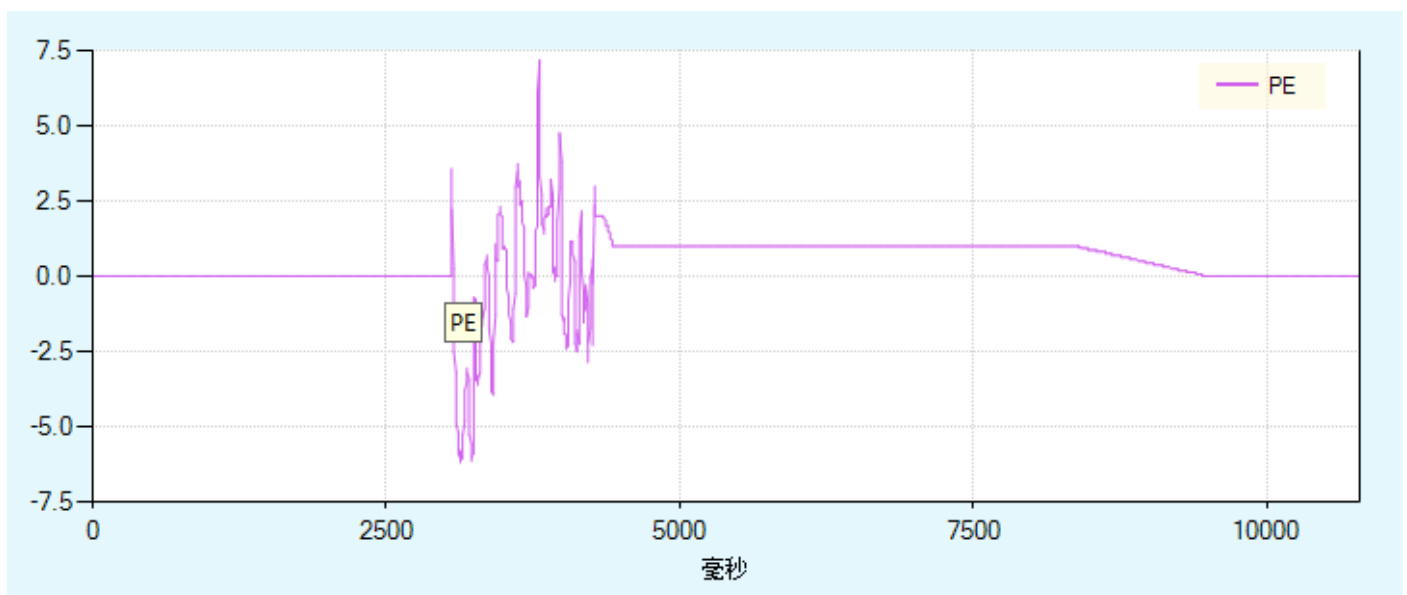


图 19 位置环: PE (位置误差)

由图像，最大位置误差为 7.5 个脉冲，根据上一部分得到的分辨率，计算得出

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

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

4.4 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。

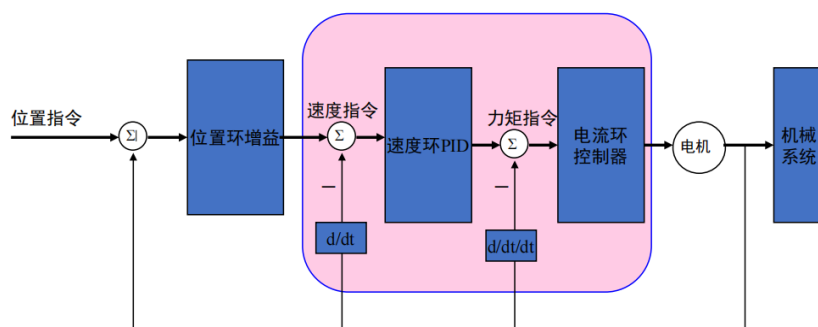


图 20

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位置的相应控制）。

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 α ），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 900000mm/min²，平滑时间 45ms

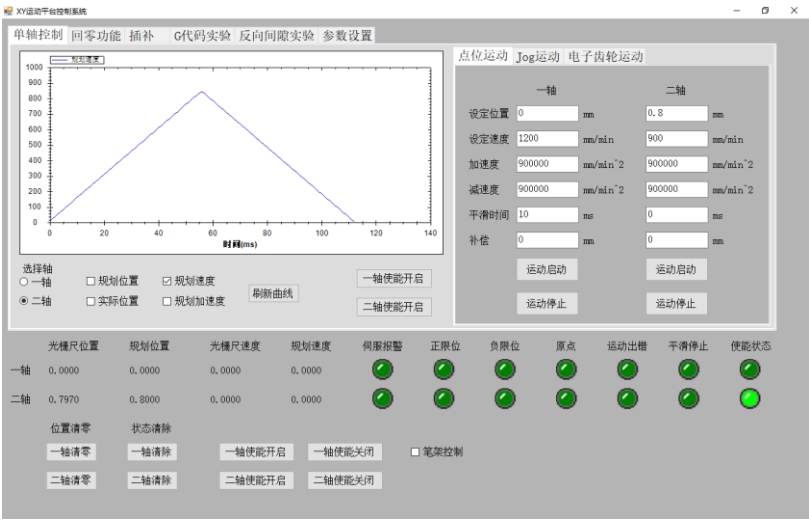


图 21 参数设置

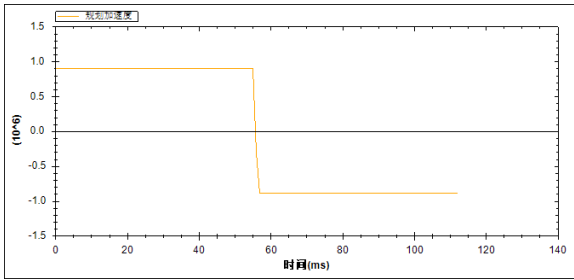


图 22 加速度

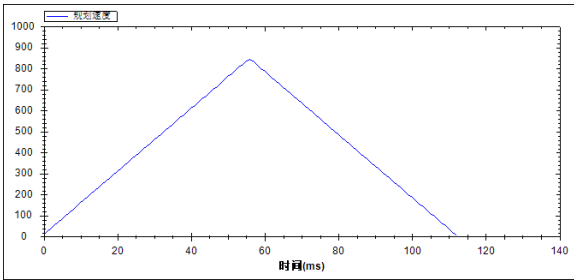


图 23 速度

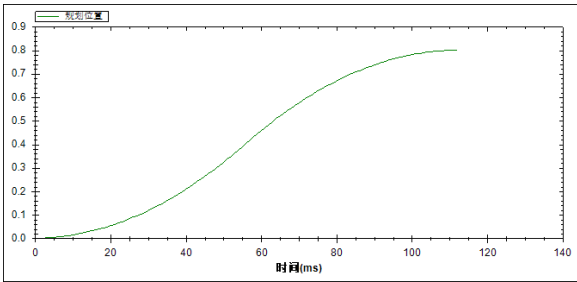


图 24 规划位置

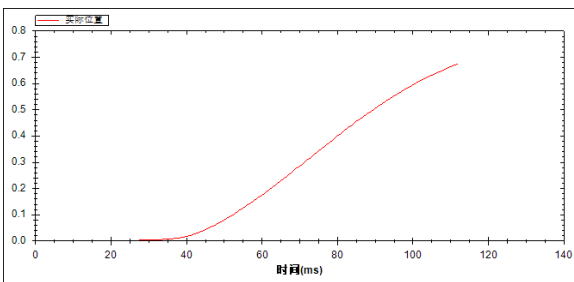


图 25 实际位置

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/min²，平滑时间 0ms

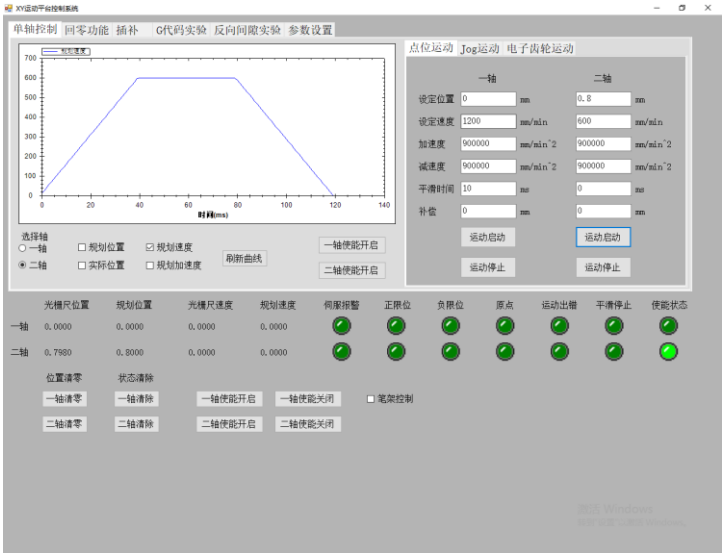


图 26 参数设置

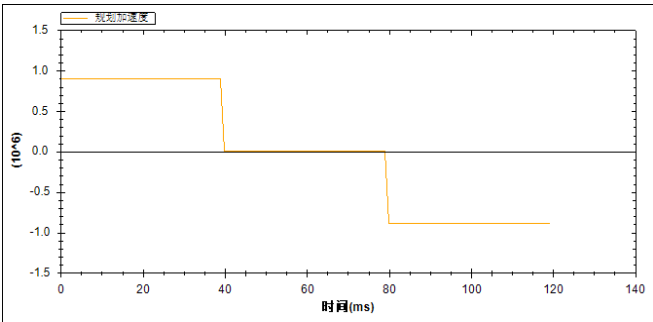


图 27 加速度

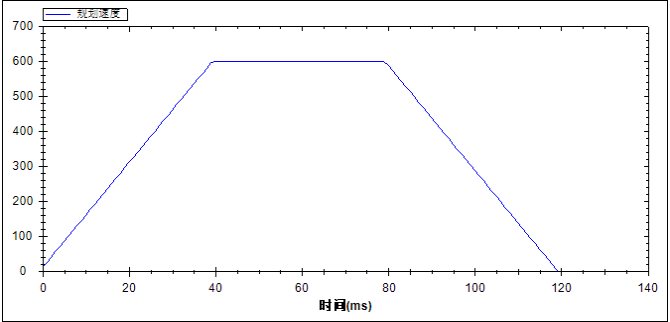


图 28 速度

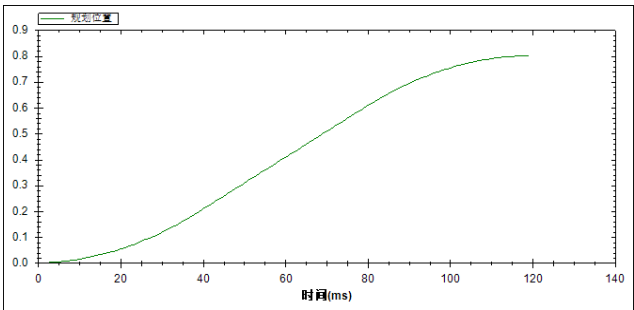


图 29 规划位置

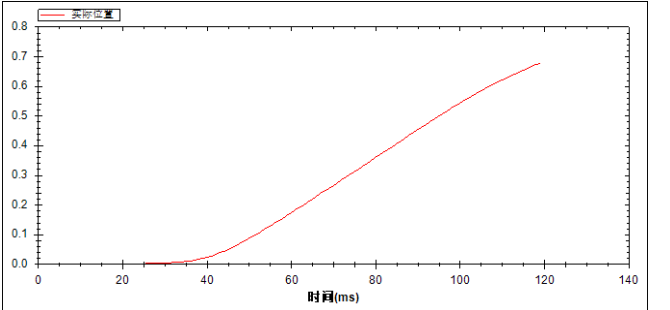


图 30 实际位置

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/min²，平滑时间 45ms

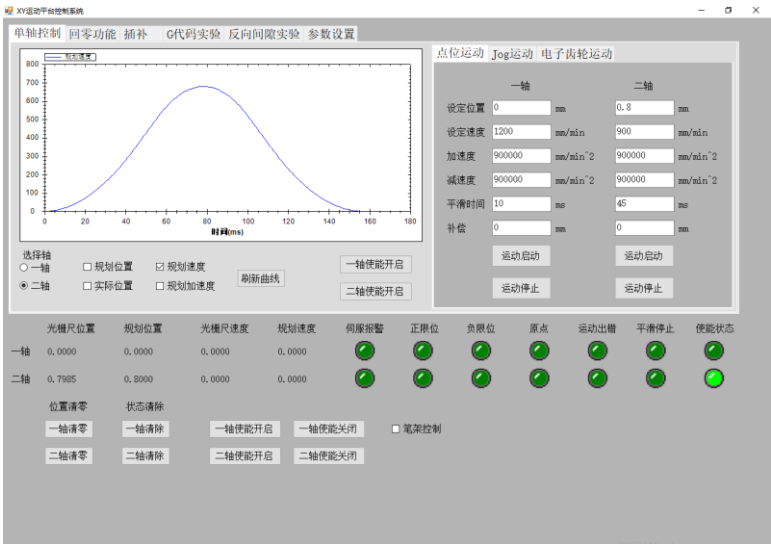


图 31 参数设置

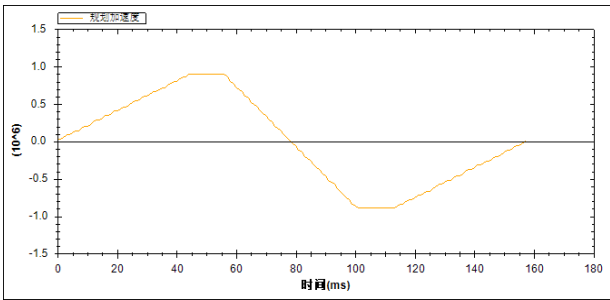


图 32 加速度

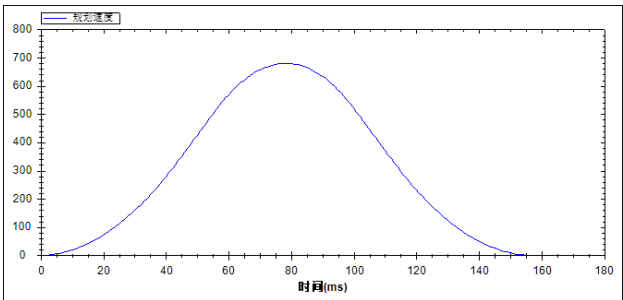


图 33 速度

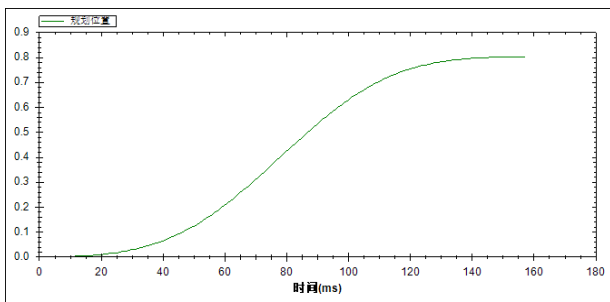


图 34 规划位置

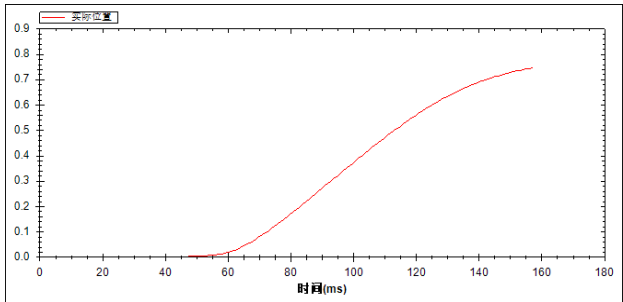


图 35 实际位置

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。

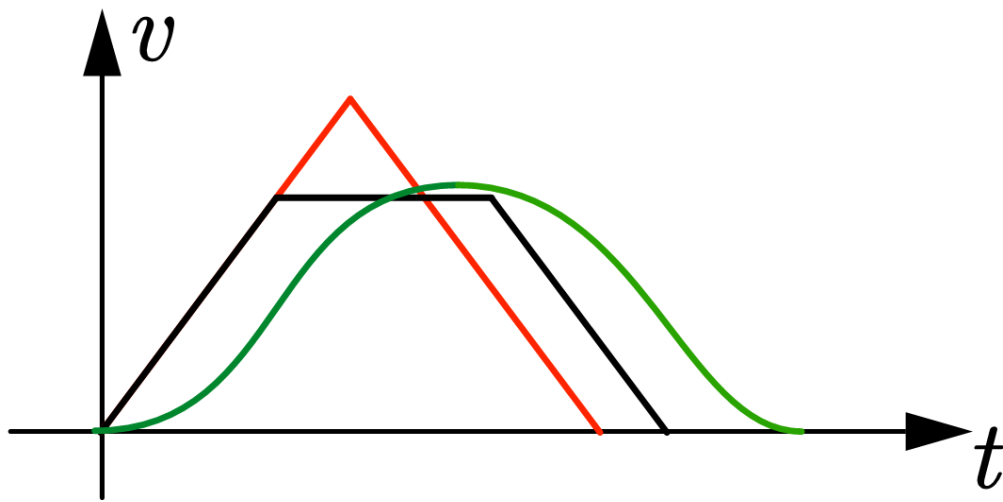


图 36 v-t 运动图像

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。

五、总结

5.1 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。

5.2 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