



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

自动控制实践 A 实验报告

专业： 自动化

班级： 班

姓名：

学号：

同组人：

实验名称： 步进电机特性实验

实验日期： 2023 年 月 日

实验与创新实践教育中心

Education Center of Experiments and Innovations

一、 实验原理

1. 步进电机的位置控制

两相混合式步进电机的结构主要由三部分构成，分别是永磁铁、转子和定子。步进电机结构的轴向剖视示意图如图 2-1-1 所示，其中定子有四线八极，但是电机

的绕线为两根，即 AA 和 BB ，称为两相步进电机。每根线错开绕制到八个磁极铁

芯上，如图 2-1-2 所示，两根线有四个引线，分为 A 、 A 和 B 、 B ，转子边缘也有

50 个小齿

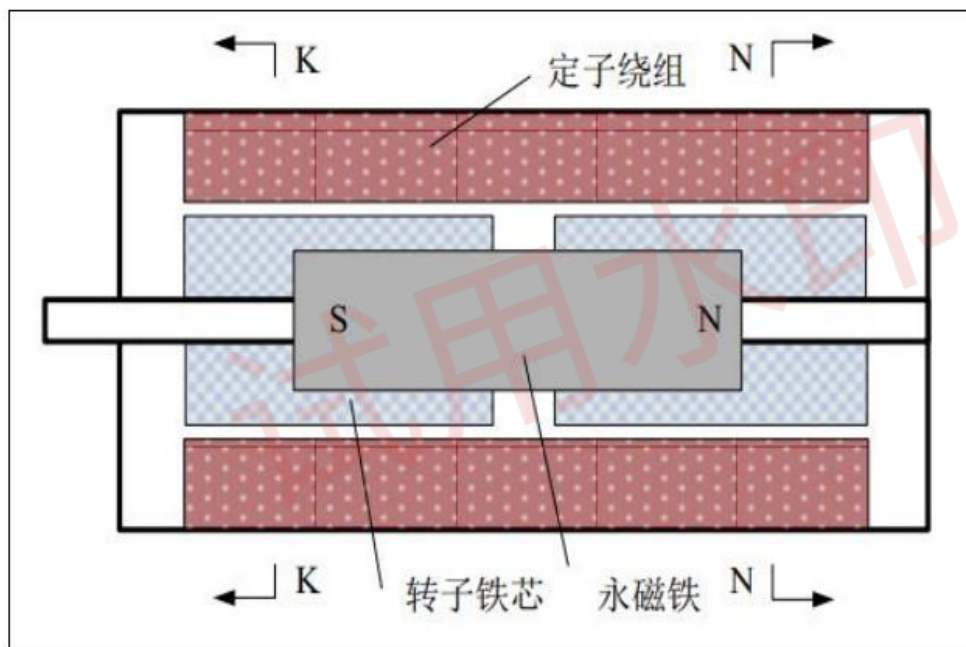


图 2-1-1 两相混合式步进电机轴向剖视结构示意图

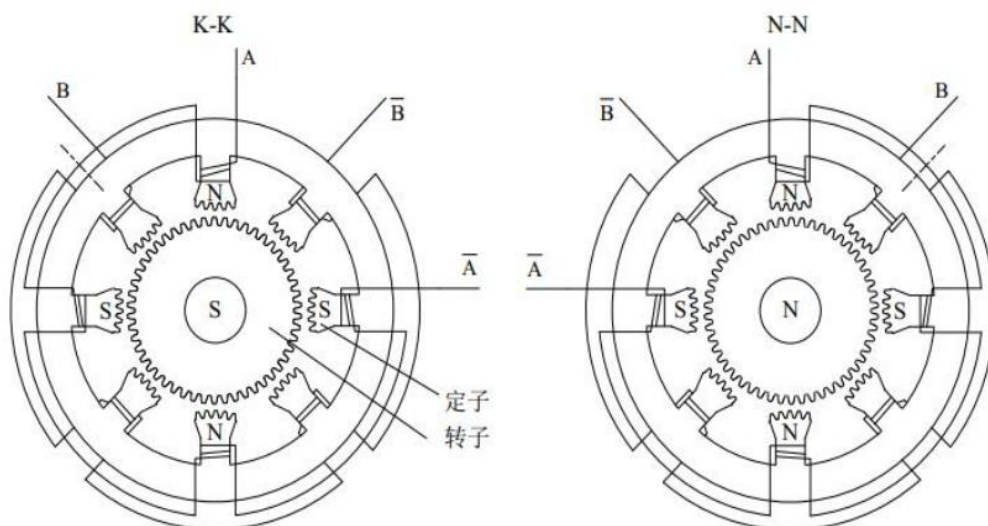


图 2-1-2 两相混合式步进电机径向剖视结构示意图

如图 2-1-2 所示，转子可看作由两段有齿环的铁芯组成，中间嵌入永磁铁，转子被分成两极，一端铁芯呈 S 极，一端铁芯呈 N 极。转子的两段铁芯外周虽然也

均匀的分布着同样数量和尺寸的小齿，但是两段铁芯上的小齿互相错位半个齿距。制造这种电机时，结构上要保证当某一磁极的小齿与转子上的小齿处于对齿时，与这个磁极相垂直的另外两个磁极上的小齿和转子上的小齿一定处于最大错位

位置。这样才能使电机在每个脉冲励磁时都有错齿状态，才有转动的力矩。因为转子也产生磁场，所以混合式步进电机的输出扭矩是转子永磁磁场和定子电枢磁场共同作用的结果，它比仅由定子产生磁场的反应式步进电机的扭矩大，也比永磁式步进电机的精度高。

基于对步进电机结构的分析，步进电机的齿距角可以由下式计算：

$$\theta_z = \frac{2\pi}{Z}$$

式中， Z 为转子齿数。

如图 2-1-2 所示，转子的齿数为 50，则齿距角为 $\theta_z = 7.2^\circ$ 。如果对绕组通电一次的操作记为 1 拍，那么两相混合式步进电机轮流通电一周就需要 4 拍，每有一

个脉冲激励，转子就走 1 步，则两相混合式步进电机转一个齿距角需要 4 步，转

子走 1 步所转过的角度称为步距角 θ_N ，即

$$\theta_N = \frac{2\pi}{NZ}$$

式中， N 为步进电机工作拍数。电机设计最终得到的步距角为 1.8° 。

由于制造时转子的 S 极端的齿和 N 极端的齿互相错半个齿，如图 2-1-2 所示，

转子分成两极，转子的 S 极与有脉冲激励的定子绕组的 N 磁极产生吸合力，与其相对应的定子 S 磁极产生排斥力。同时，转子的 N 极与有脉冲激励的定子绕组的 S 磁极产生吸合力，与其相对应的定子 N 磁极产生排斥力。每次脉冲激励，转子转过 1/4 个齿距，转过一个齿距角需要通电四次，两相混合式步进电机只有两个相，为实现 4 次换相通电，就需要对某一相分别正向和反向通电。如果每次只励磁一个绕组，只有一个绕组导通的方式称为单相运行，用 A 表示 A 相电流正向流过， \bar{A} 表示 A 相电流反向流过， B 通电也是如此，则两相混合式步进电机的单相运行顺时针旋转方式为 $A \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{B}$ 。逆时针通电顺序为 $A \rightarrow \bar{B} \rightarrow \bar{A} \rightarrow B$ 。两相混合式步进电机也可以同时激励两个绕组，双绕组励磁顺时针通电顺序为 $AB \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow AB \rightarrow \bar{A}\bar{B}$ 。逆时针通电顺序 $AB \rightarrow \bar{A}B \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow AB$ 。两相通电方式产生的力矩比单相通电方式要大。

如果将单相励磁和两相励磁交替组合在一起，就形成单双八拍方式，顺时针运行的通电顺序为 $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow AB \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow \bar{B} \rightarrow \bar{A}\bar{B}$ ，逆时针运行的通电顺序为 $A \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow \bar{B} \rightarrow \bar{A}B \rightarrow \bar{A} \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow AB$ 。

本实验采用步进驱动器控制步进电机，当驱动器细分为 2000 时，驱动器发送 2000 个脉冲电机转动一圈。通过控制驱动器发出的脉冲个数，可以对电机位置进行控制。实验时首先设置驱动器的细分，细分设置见附录 1 表 1-7 所示，然后给控制器设定位置脉冲数（一般给定的脉冲数为细分数乘以电机转数）、速度以及加速度，运行程序后，得到编码器反馈的脉冲数。经过计算得到电机轴的角位移，与控制信号进行比较，可以验证对电机的位置控制是否准确。

2. 步进电机的矩频特性

1. 步距角

步距角是指步进电机在一个（即一拍）电脉冲的作用下，转子所转过的角位移，也称为步距。它的大小预定自控制绕组的相数、转子的齿数和通电方式有关，体现了系统能达到的分辨能力。步距角的计算公式为：

$$\theta_b = \frac{\text{齿矩角}}{\text{拍数}} = \frac{\text{齿矩角}}{Km} = \frac{360^\circ}{Kmz} \quad (2-2-1)$$

式中： θ_b 是步进电机的步距角； K 为状态系数，当相邻两次通电的相数相同（ x 相单 x 拍或 x 相双 x 拍）时， $K=1$ ，而采用相邻两次通电的相数不同（ x 相单、

双 2x 拍，如三相单、双六拍通电方式运行）时， $K=2$ ； m 为控制绕组的相数； z 为转子的齿数。

步进电机的相数和转子齿数越多，步距角就越小，控制就越精确。所以步进电机可以做三相，也可以做两相、四相、五相或更多相数。

步进电机在一定的脉冲频率下，电机的相数和转子齿数越多，转速（r/min）就越低。而且相数越多，驱动电源也越复杂，成本也就越高。

2. 静特性

步进电机的静特性是指稳定状态时的特性，包括静转矩、矩角特性及静态稳定区等。当步进电机得到连续控制脉冲时，某些绕组按照预定通电方式轮流通电，转子便一步步转动。当控制脉冲停止时，某些相绕组仍能通入恒定不变的电流，这时转子固定于最后一步的位置上保持不动，成为静态状态。

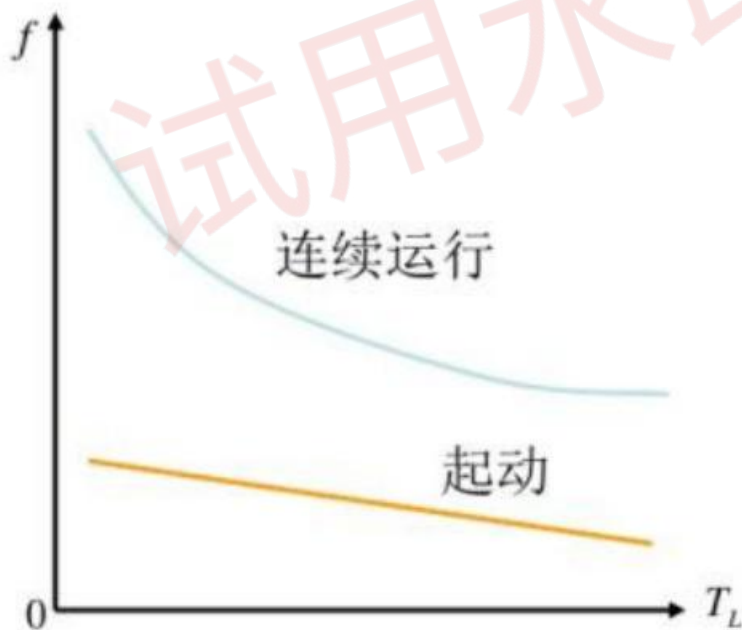
3. 最大相电压和最大相电流

最大相电压和最大相电流分别是指每相绕组允许施加的最大电源电压和流过的最大电流。

4. 启动频率和连续运行频率

步进电机的工作频率，一般包括启动频率、制动频率和连续运行频率，对同样的负载转矩来说，正反向的启动频率和制动频率是一样的，所以一般技术数据里给出启动频率和连续运行频率。

5. 矩频特性



当步进电机的控制绕组的电脉冲时间间隔大于电机机电过渡过程（指由于机械惯性及电磁惯性而形成的过渡过程）所需时间时，步进电机进入连续运行状态。这时产生的转矩成为动态转矩。步进电机施加一定的负载下，动态转矩和运行脉冲频率的关系称为矩频特性。步进电机的动态转矩随着脉冲频率的升高而降低。步进电机进入连续运行状态时产生的转矩称为动态转矩。在一定的负载转矩下能够不失步的最高脉冲频率称为此负载下的电机连续运行频率。步进电机的动态转矩和运行的最高脉冲频率的关系称为矩频特性。步进电机的动态转矩随着运

行脉冲频率的升高而降低。

实验设定不同的加速度，使电机耗尽自身的转矩，即步进电机持续加速到某个速度时，根据矩频特性，此时电机所提供的转矩不能满足加速所需，会造成较大的位置误差，内部发生报警，电机停止运转。此时即可得到电机转矩维持设定加速度的状态下，系统所能达到的最大速度。故由最大转速可计算得到脉冲频率，从而得到动态转矩与脉冲频率的特性曲线，即电机的矩频特性。

电机轴的转矩平衡方程如下式：

$$M_m(t) = J \frac{d\omega_m(t)}{dt} + M_L(t)$$

式中： $M_m(t)$ 为电枢电流产生的电磁转矩； J 为整个系统折算到电机轴的转动惯量； $M_L(t)$ 为负载力矩折算到电机轴上的转矩。由式（2-2-2）计算电机此时的动态转矩，可得到电机速度与动态转矩的特性曲线。由于步进电机的脉冲频率 $f(\text{HZ})$ 与转速 $n(\text{r/min})$ 有如下关系：

$$n = \frac{60f}{Z_r N} \quad (2-2-3)$$

则由最大转速可计算得到脉冲频率，从而得到动态转矩与脉冲频率的特性曲线，即电机的矩频特性。

二、 实验内容

2.1 步进电机的位置控制

1. 打开电源

2. 航空插头 CN1 与直流电源的正负端连接，红接正，黑接负，直流电源的供电电源和 AC220V 连接
3. 依次打开设备上的断路器，数字电源的开关，设置电源电压为 48V；
4. 依据驱动器细分设置表设定驱动器的细分（改变细分时需要切断驱动器电源），本实验设定细分为 40000；
6. 按下数字电源的 Output 键
6. 在电机输出端悬挂三个 200g 的负载
7. 打开 Matlab，路径为 C:\ProgramFiles\MATLAB\R2015b\workspace\StepMotorExam\SMExp1.slx
8. 双击 Rise Pos (pulse) 设为 500000，Drop Pos (pulse) 设为-500000，速度设为 180r/min（位置控制实验其范围为：0-185），加速度设为 150rpm/s（位置控

制实验其范围为：0-200)

9. 编译程序

10. 运行程序，双击 Switch2 将开关拨到 Drop Pos (pulse)，再双击 Switch1 将开关拨到下方，电机运行，负载向下运动

11. 负载向下运动到指定位置后停止程序，切换 Switch2 到 Rise

Pos (pulse)，再运行程序，负载向上运动，运动停止后，点击停止程序，在监视

数据框 Encoder Axis Pos Value 中可读取到输出轴的位移值为 309.9° (

12. 双击 Switch1 将开关打到上方，恢复初始状态；

13. 双击程序中的电机速度曲线示波器，可得电机的速度曲线，如图 3-1-6 所示

14. 其他条件不变，重复步骤 8-13，将 Rise Pos (pulse) 和 Drop Pos (pulse) 分别设为下表所示的值

15. 记录给定控制器脉冲 Rise Pos (pulse)、监视数据框 Encoder Axis Pos Value 的输出轴角位移和 pulse 读出的脉冲数

3.2 步进电机的矩频特性

1. 打开电源

2. 航空插头 CN1 与直流电源的正负端连接，红接正，黑接负，直流电源的供电电源和 AC220V 连接

3. 依次打开设备上的断路器，数字电源的开关，设置电源电压为 48V；

4. 依据驱动器细分设置表（见附录 1 表 1-7）设定驱动器的细分（改变细分时要给驱动器断电），本实验设定的细分为 40000；

5. 按下数字电源的 Output 键

6. 在电机输出端悬挂 4 个 1kg 的负载

7. 打开 Matlab，路径为 C:\ProgramFiles\MATLAB\R2015b\workspace\StepMotorExam\SMExp2.slx

8. 双击 Rise Pos (pulse) 设为 20000000，Drop Pos (pulse) 设为-1500000，ExpVel (r/min) 设为 10000（实验中此数值固定不变，只是表示能提供给电机转速

一个充分大的转速提升范围，但在实验中未能达到），Universal Vel (r/min) 设为

180r/min（矩频特性实验中其范围为：0-185），加速度设为 100rpm/s（矩频特性

实验中其范围为：0-200）；

9. 双击 Switch2 将开关拨到 Drop Pos (pulse)，再双击 Switch3 将开关拨到 Universal Vel (r/min)；

10. 编译程序

11. 运行程序，双击 Switch1 将开关拨到下方，电机运行，负载向下运动

12. 当到达位置时，负载停止运动
停止程序，双击 Switch2 将开关
拨到 Rise Pos (pulse)，再双击 Switch3 将开关拨到 ExpVel (r/min)；
13. 重新运行程序，负载向上运动，当负载停止运动时，停止程序；
14. 双击程序中的电机速度曲线示波器，可得电机的速度曲线
15. 将加速度依次设置为如表 3-2-1 所示的数值，重复步骤 13-14，记录不同加速度下的最大速度；
16. 实验结束后，将 Rise Pos (pulse) 设为 800000，Switch2 拨到 Rise Pos (pulse)、Switch3 拨到 Universal Vel (r/min)，运行程序，将 Switch1 拨到下方，当负载接近桌面时停止程序
17. 根据给定的初始加速度，记录电机最大速度，计算电机在砝码负载下的转矩，计算电机运行最大脉冲频率，对数据进行拟合得到转矩速度特性曲线、矩频特性曲线。

三、 实验结果及分析

4.1 步进电机的位置控制实验分析

表 4-1 实验数据记录（每台设备数据不同）

	电机轴指定位置脉冲设置 Rise Pos (pulse)	输出轴角位移 (degree)	输出轴脉冲数 (pulse)
1	500000		
2	1000000		
3	1500000		
4	2000000		
5	2500000		

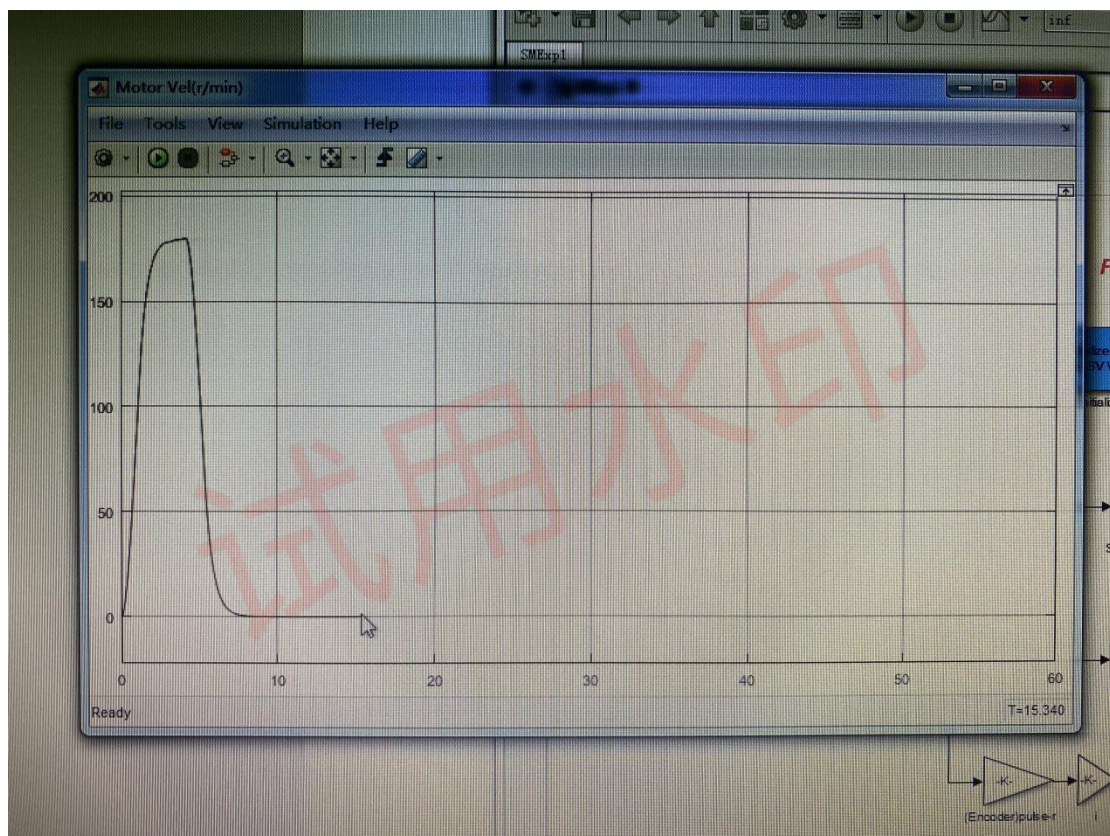
310.5	34500
620.9	68990
931	103440
1241	137900
1552	172420

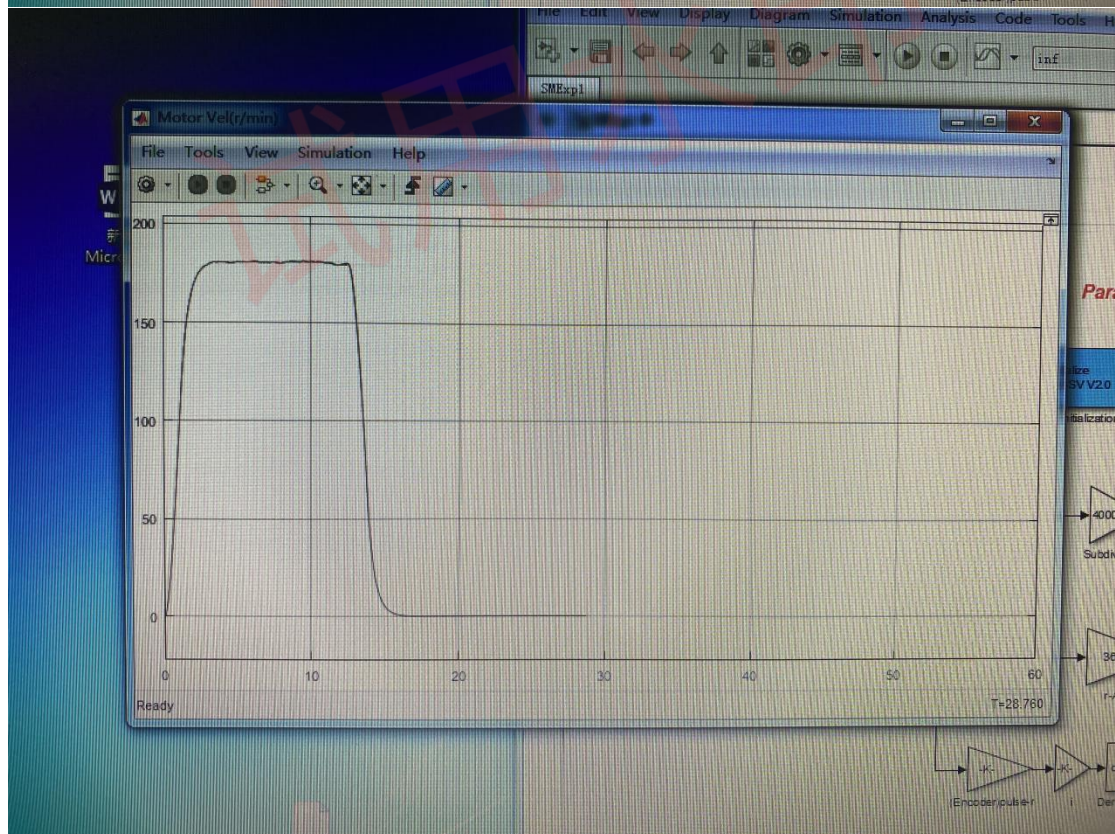
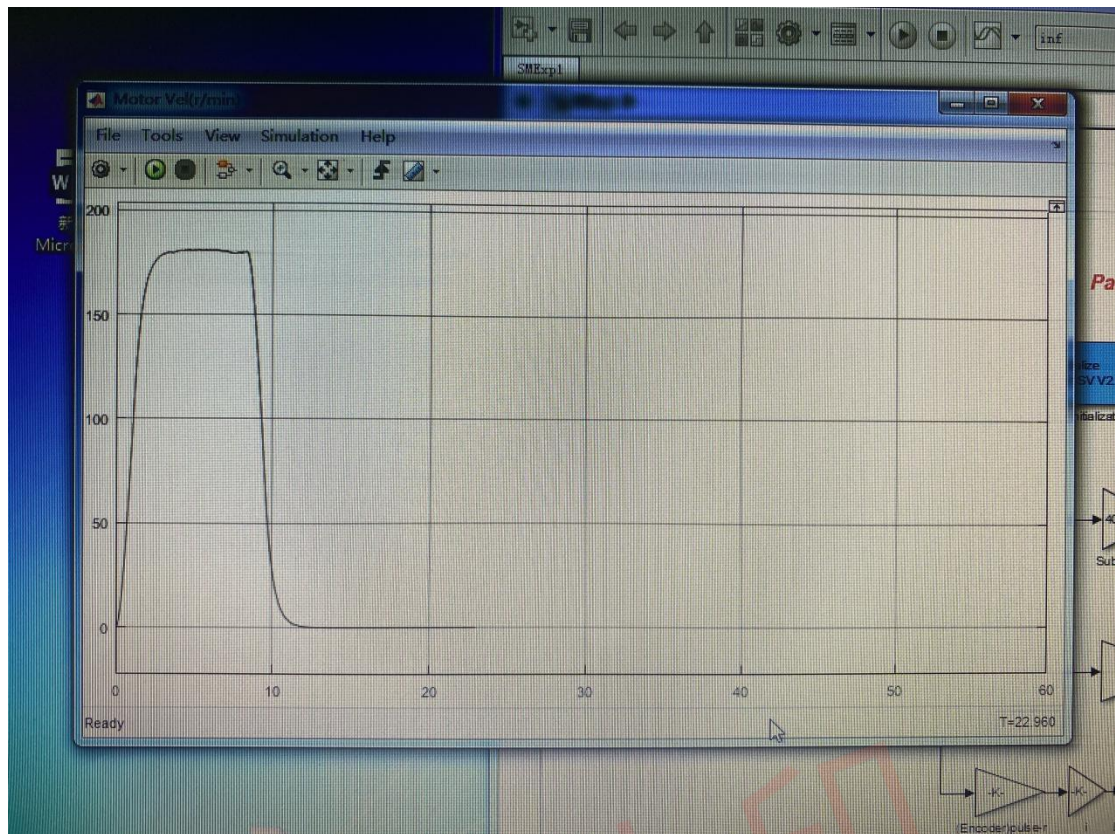
计算传动比为 1000: 69

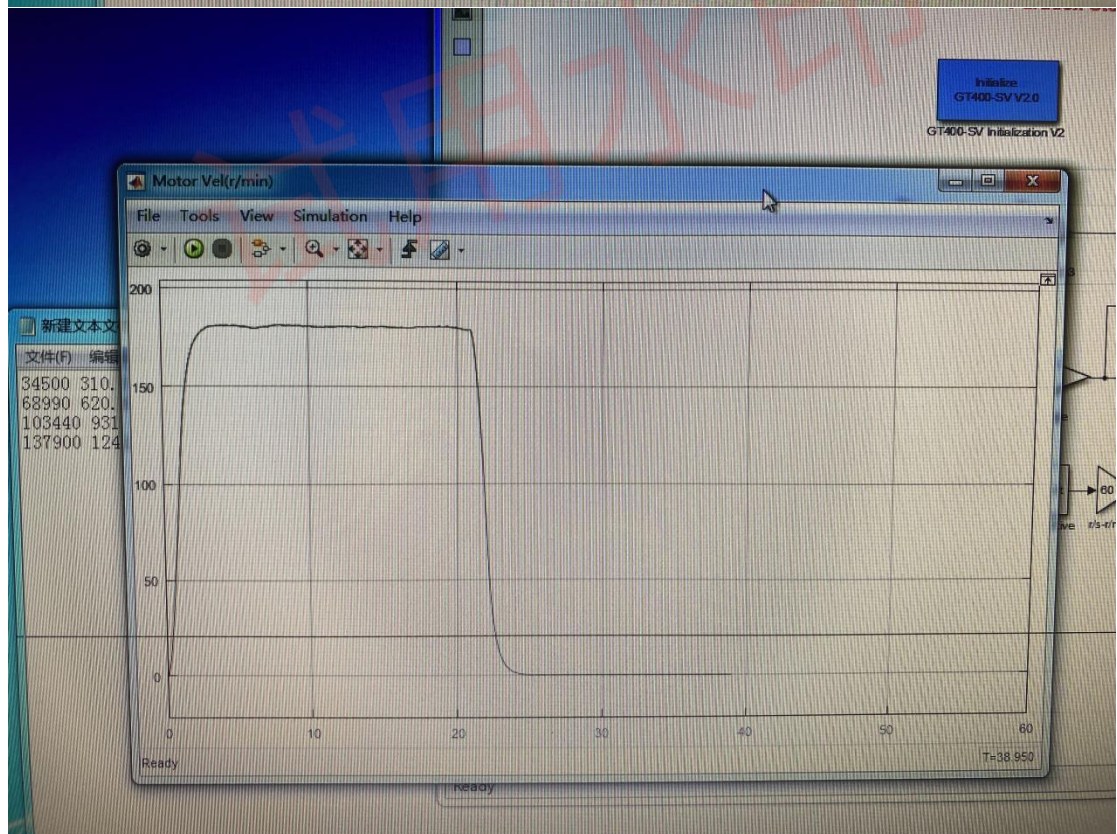
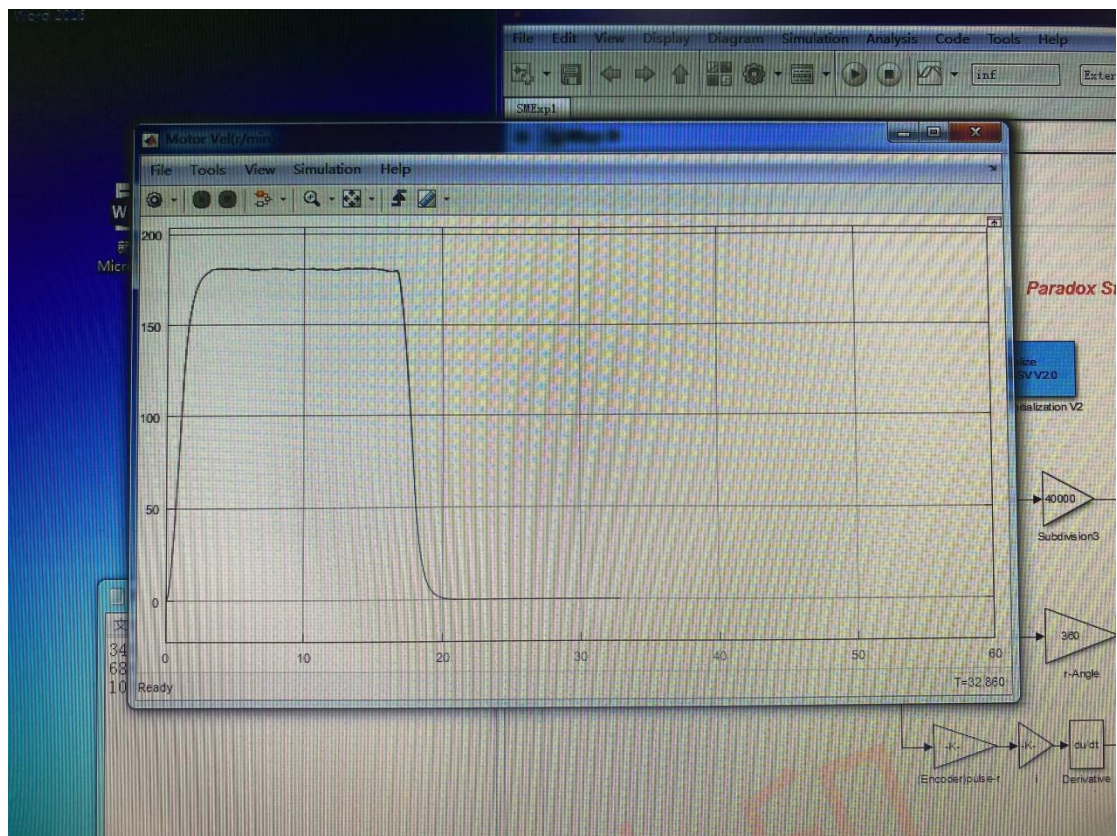
通过理论计算电机在 2, 3, 4, 5 情况下的输出脉冲应为 69000, 103500, 138000, 172500, 经过对比理论计算与实际输出几乎完全一致, 与预测结果一致, 得出结论

步进电机运行非常稳定, 传动比几乎不变

实验曲线:







五张分别为不同指定输出脉冲数下的速度曲线，分析：

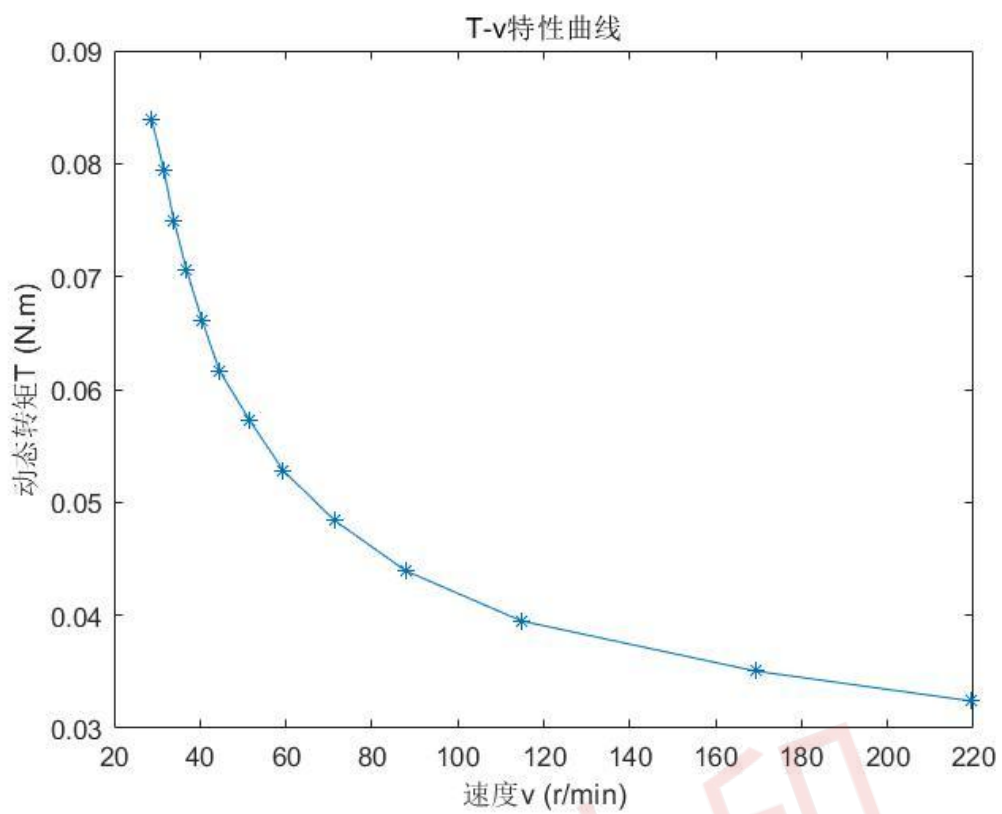
设定脉冲数越多，步进电机稳定运行时间越长，同时步进电机运行时速度先增加后稳定，后快速衰减，在大部分时间都在匀速运行，加减速时间很短，所以步进电机运行稳定

表 4-2 实验数据记录（每台设备数据不同）

	加速度 α (rpm/s)	最大速度 v (r/min)	电机扭矩 T ($N \cdot m$)	脉冲频率 f (Hz)
1	100			
2	250			
3	500			
4	750			
5	1000			
6	1250			
7	1500			
8	1750			
9	2000			
10	2250			
11	2500			
12	2750			
13	3000			

100	219.6	0.032399422	146400
250	169.2	0.035061054	112800
500	114.8	0.039497108	76533
750	87.9	0.043933162	58600
1000	71.4	0.048369216	47600
1250	59.4	0.05280527	39600
1500	51.6	0.057241324	34400
1750	44.5	0.061677377	29666
2000	40.5	0.066113431	27000
2250	36.9	0.070549485	24600
2500	33.9	0.074985539	22600
2750	31.6	0.079421593	21066
3000	28.8	0.083857647	19200

T-v 特性曲线



矩频特性曲线

