



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

# 《自动控制实践 A》实验报告

2021 年秋季学期

实验项目: 步进电机特性实验

学生学号: 190410102

学生姓名: 方尧

评阅教师: \_\_\_\_\_

报告成绩: \_\_\_\_\_

实验与创新实践教育中心印制

## 一、简述实验原理

### 1.1 步进电机的位置控制

#### 步进电机结构分析

齿距角  $\alpha_z = \frac{2\pi}{Z}$ , 步距角  $\alpha_n = \frac{2\pi}{Nz}$  ( $Z$  为转子齿数,  $N$  为拍数)

两相混合式步进电机的单相运行顺时针:  $A \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{B}$ , 逆时针通电顺序  $A \rightarrow \bar{B} \rightarrow \bar{A} \rightarrow B$

两相激励两个绕组  $AB \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow A\bar{B} \rightarrow \bar{A}B$  (顺时针),  $AB \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow \bar{A}B \rightarrow AB$  (逆时针)

单双八拍方式运行, 顺时针  $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow \bar{B} \rightarrow A\bar{B}$ , 逆时针  $A \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow \bar{B} \rightarrow \bar{A}B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow B \rightarrow AB$

### 1.2 步进电机矩频特性

步距角  $\theta_b = \frac{360^\circ}{f_{mz}}$ , 矩频特性: 步进电机施加一定负载下, 动态转矩和运行脉冲频率的关系

称为矩频特性, 转矩平衡方程如下  $M_m(t) = J \frac{d\omega_m(t)}{dt} + M_L(t)$ , 与  $n$  有关系  $n = \frac{60f}{Z \cdot N}$

### 1.3 步进电机的惯量匹配

$J_z = \sum M_i r_i^2$ , 工程上根据需要选定惯量  $J_d$ , 电机转子  $J_m$ , 总惯量  $J_d$ , 比值在  $\frac{1}{4} \leq \frac{J_d}{J_m} \leq 5$  时, 认为惯量匹配

## 二、实验内容

### 2.1 步进电机的位置控制

- ① 连接运动控制卡与端子板连接。
- ② 直接电源, 设置电压
- ③ 设定驱动器细分数
- ④ 给设备供电, 输出电源 "output".
- ⑤ 给定 200g 负载
- ⑥ 打开 Matlab 实时控制程序,
- ⑦ 设置参数, 编译运行
- ⑧ 给定 Rise Pos 和 Drop Pos 为表中值, 分别输出实验结果图, 记录数据 (Rise pos 分别为 5e5, 1e6, 1.5e6, 2e6, 2.5e6; Drop Pos 为 Rise pose 相反数)

### 2.2 步进电机的矩频特性

- ① 连接运动板卡, 直接电源, 设置驱动器细分数
- ② 给设备供电
- ③ 给定 4x1kg 负载
- ④ 打开 Matlab 实时控制程序
- ⑤ 设置参数, 编译运行
- ⑥ 给定加速度设定值分别为 100, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500, 2750, 3000, 记录各加速度下最大速度  $V$ , 计算转矩  $T$  和最大脉冲频率, 拟合得到转矩速度特性曲线和矩频特性曲线。

### 2.3 步进电机的惯量匹配

- ① 连接运动板卡, 直接电源, 设置驱动器细分数为 2000,
- ② 给设备供电
- ③ 给定 3x200g 负载
- ④ 打开 Matlab, 设置 Rise Pos 为 1200000, Drop pos 为 -1200000. 速度设置为 300r/min
- ⑤ 加速度设置为 200rpm/s
- ⑥ 编译运行
- ⑦ 拨动开关, 使得负载向下, 向上运行。
- ⑧ 停止程序
- ⑨ 得到电机速度曲线, ⑩ 给数据进行傅里叶变换, 观察低次谐波振幅峰值
- ⑪ 在电机轴转盘安装 6x42g 惯量块, 重复上述操作, 得到加惯量块之后的速度规划傅里叶频谱图和电机速度曲线图。

### 三、实验结果分析（附图表）

#### 3.1 步进电机的位置控制实验分析

(1) 步进电机的位置控制实验中，自行设置 5 组电机轴指定位置脉冲，记录给定控制器脉冲数 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。记录数据如下表 1:

表 1

	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	310.9	34540
2	1000000	621.5	69060
3	1500000	932	103560
4	2000000	1243	138090
5	2500000	1554	172620

(2) 据第一组设定的参数和记录的数据结果，计算电机与输出轴的传动比；在已知传动比的情况下，再通过设定的其他参数，通过理论计算预测电机的指定位置，然后再通过实验记录数据，验证对比理论与实测结果是否符合，并得出结论。

$$\text{电机与输出轴的传动比} i = \frac{\text{电机轴指定位置脉冲数}}{\text{输出轴脉冲数}} = \frac{500000}{34540} = 14.48$$

由输出轴角位移计算实际电机轴位置脉冲公式如下:

$$\text{实际电机轴位置脉冲} = \frac{\text{电机轴角位置} \times \text{当前传动比} \times \text{电机轴细分数}}{360^\circ}$$

由输出脉冲数计算实际电机轴位置脉冲公式如下:

$$\text{实际电机轴位置脉冲} = \text{输出轴脉冲数} \times \text{传动比}$$

$$\text{实际电机轴位置脉冲最小分辨力} = \frac{\text{当前传动比} \times \text{电机轴细分数}}{\text{编码器码数}} = 144.76$$

根据公式计算得到结果如下表 2:

表 2

	电机轴指定位置脉冲设置 Rise Pos (pulse)	实际输出轴脉冲-角位移计算 (pulse)	绝对误差 (pulse)	相对误差 (%)	实际输出轴脉冲-脉冲数 计算 (pulse)	绝对误差 (pulse)	相对误差 (%)
1	500000	500065	65	-0.131	500001	1	-0.002
2	1000000	999648	352	0.352	999713	287	0.288
3	1500000	1499070	930	0.620	1499135	865	0.577
4	2000000	1999296	704	0.352	1998991	1009	0.505
5	2500000	2499523	477	0.191	2498847	1153	0.461

分析可知，实际与理论误差小，相对误差均小于千分之一，说明步进电机位置控制性能极好。但从实验中可以看出 2-5 组实验绝对误差都大于一个最小分辨力，故步进电机仍有位置控制误差。

综上，实验中步进电机位置控制性能极好，但仍有极小的位置控制误差。



3.2 步进电机的矩频特性实验分析

(1) 按表 4-2 中格式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。

电机转矩的计算式为  $T(t) = J \times \alpha_m + T_L(t)$ ，整个系统折算到电机轴的转动惯量

$$J = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 = 159.586 + 6.734 + 0.062 + \left(\frac{1}{16}\right)^2 (159.586 + 4 \times 12.5^2 = 1.6945 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

负载阻力扭矩： $T_L(t) = 0.031 \text{N} \cdot \text{m}$

脉冲频率计算式为： $f = \frac{v}{60} \times 40000$

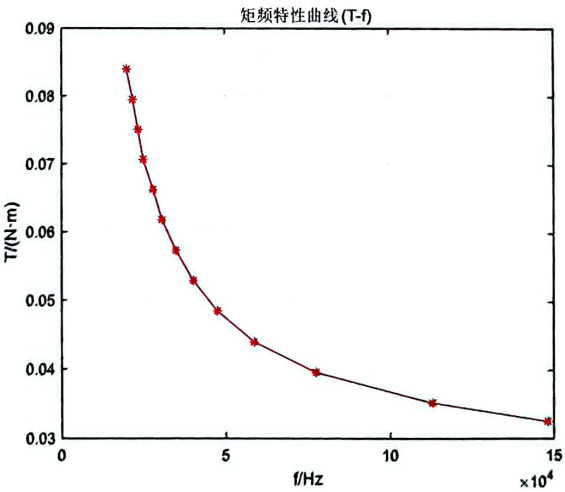
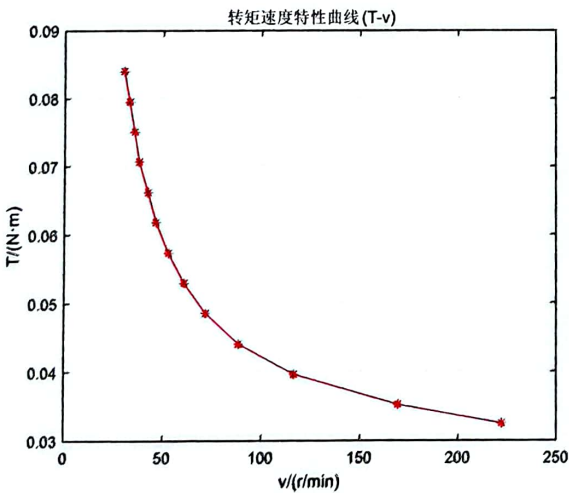
计算电机运行转矩  $T$  和电机脉冲频率  $f$  如下表 3：

表 3

	加速度 $\alpha$ (rpm/s)	最大速度 $v$ (r/min)	电机扭矩 $T$ (N · m)	脉冲频率 $f$ (Hz)
1	100	222	0.0324	148000
2	250	169.2	0.0351	112800
3	500	116.2	0.0395	77467
4	750	88	0.0439	58666
5	1000	71.2	0.0484	47467
6	1250	60.3	0.0528	40200
7	1500	52.3	0.0572	34867
8	1750	46	0.0617	30667
9	2000	41.9	0.0661	27933
10	2250	37.35	0.0706	24900
11	2500	35	0.0750	23333
12	2750	32.5	0.0794	21667
13	3000	29.8	0.0839	19867

(2) 按表 4-2 填写好内容后，对数据进行拟合得到转矩速度特性曲线、矩频特性曲线。分析实验结果说明了什么，按照自己的理解去阐述。

转矩速度特性曲线、矩频特性曲线如下：



结果：步进电机的动态转矩随脉冲频率的升高而降低，这种情况类似于功率管的功率和频率一样，存在相互制约的关系。

### 3.3 步进电机的惯量匹配实验分析

#### (1) 惯量匹配计算

##### ① 计算不加惯量块时系统的惯量比 $J_d/J_m$ 。

电机转子转动惯量为:  $J_m = 55 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$

不加惯量块时系统折算到电机轴转动惯量为:  $J_d = 169.45 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$

不加惯量块时系统惯量比  $\frac{J_d}{J_m} = \frac{169.45}{55} = 3.08 < 5$

##### ② 计算加 6 个 42g 惯量块之后系统的惯量比 $J_d/J_m$ 。

小惯量块对电机轴转动惯量

$$J_{z1} = \frac{1}{2} m R^2 + m d^2 = \frac{1}{2} \times 0.006 \times 5^2 + 0.006 \times 35^2 = 7.43 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

大惯量块对电机轴转动惯量

$$J_{z2} = \frac{1}{2} m R^2 + m d^2 = \frac{1}{2} \times 0.042 \times 10^2 + 0.042 \times 35^2 = 53.55 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

加 6×42g 惯量块时系统惯量比  $\frac{J_d + 6 \times J_{z2}}{J_m} = \frac{169.45 + 53.55 \times 6}{55} = 8.92 > 5$

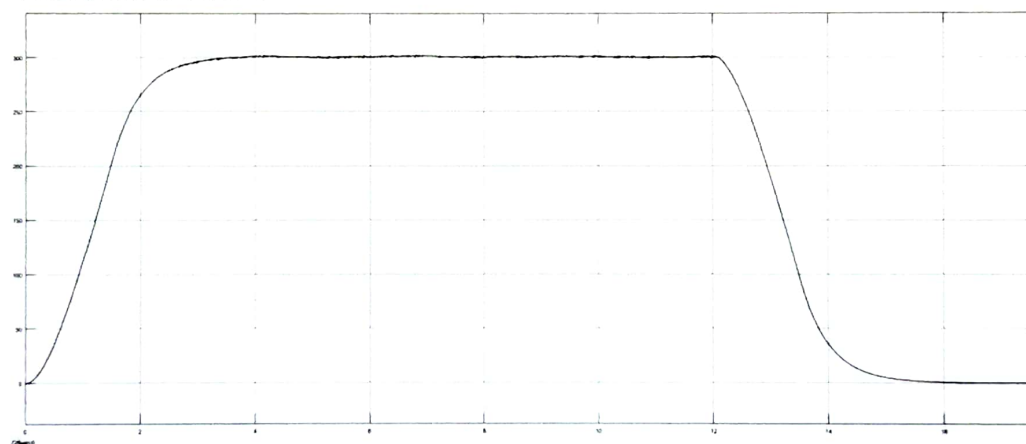
此时惯量不匹配, 转动惯量大导致振动时加速度小, 波动平稳。

#### (2) 结合上一步计算结果, 阐述惯量匹配、速度频谱分析的目的与意义。

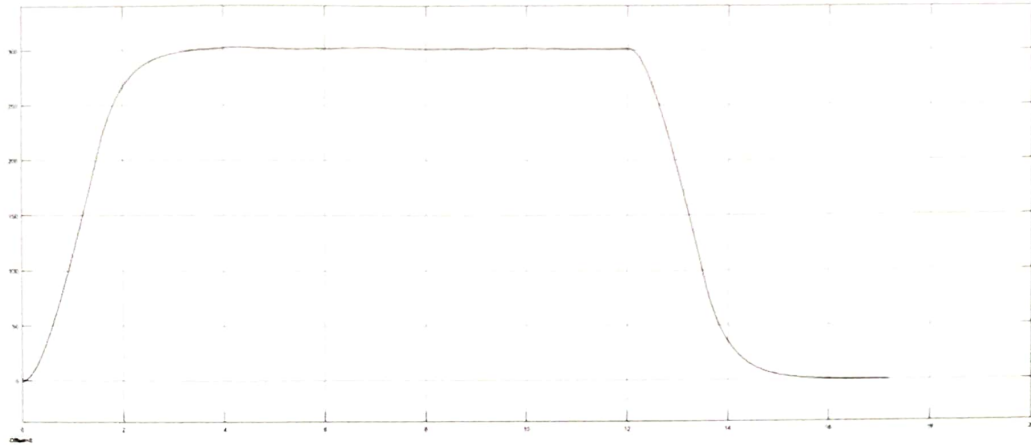
惯量匹配、速度频谱分析的目的与意义是调整机械系统的振动频率, 使得振动频率与速度规划的振动频率避开, 避免产生共振, 影响系统;

通过对速度的频谱分析可以得到系统的信号带宽, 从而更好的调整惯量, 避免共振。

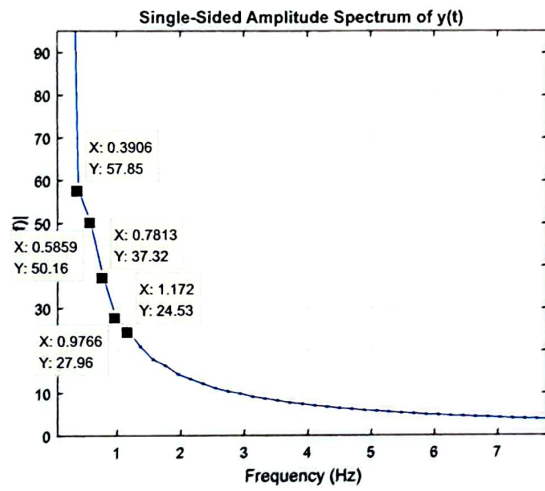
不加惯量块电机速度曲线:



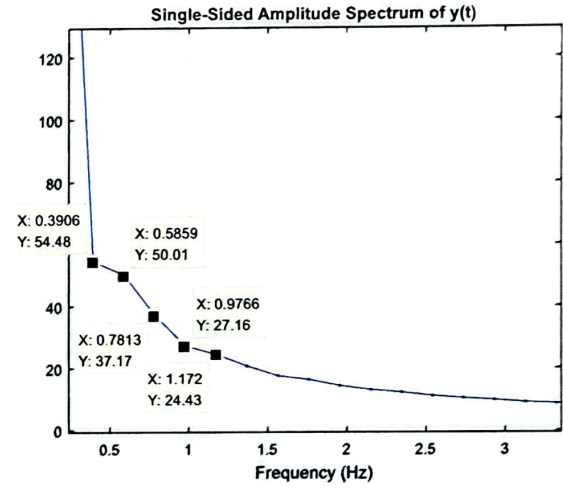
加入  $6 \times 42\text{g}$  惯量块后电机速度曲线:



可知, 加入惯量块后, 毛刺变小, 振动更小。



不加惯量块速度规划曲线傅里叶分析



加入惯量块后速度规划曲线傅里叶分析

从傅里叶变换结果可知, 加入惯量块后低频分量变得更小, 即振幅更小, 故从速度曲线上可以看到加入惯量块之后波动变小、毛刺减少。