



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： 自动化 1 班

姓名： 吕家昊

学号： 210320111

同组人： 崔哲豪

实验名称： 步进电机特性实验

实验日期： 2023 年 10 月 19 日

实验与创新实践教育中心

Education Center of Experiments and Innovations

一、 实验原理

步进电机位置控制

两相混合式步进电机由永磁铁、定子、转子组成。其中定子有四线八极，但是电机的绕线为两根，即 $A\bar{A}$ 和 $B\bar{B}$ ，称为两相步进电机。每根线错开绕制到八个磁极铁芯上，两根线有四个引线，分为 A, \bar{A} 和 B, \bar{B} ，转子边缘也有 50 个小齿。

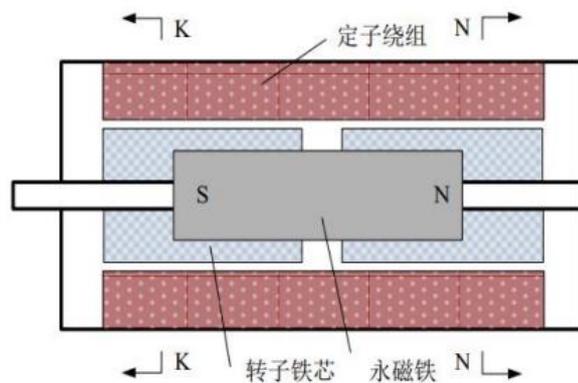


图 2-1-1 两相混合式步进电机轴向剖视结构示意图

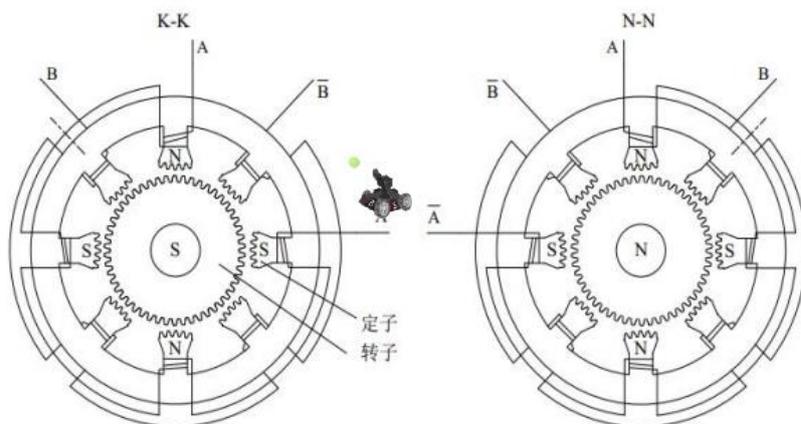


图 2-1-2 两相混合式步进电机径向剖视结构示意图

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地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齿位置，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转矩大，也比永磁式步进电机的精度高。

步进电机齿距角 $\theta_z = \frac{2\pi}{Z}$ ， Z 为转子齿数。图中转子齿数为 50，齿距角 $\theta_z = 7.2^\circ$ 。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需要 4 拍，每有一个脉冲激励转子走 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 $\theta_N = \frac{2\pi}{NZ}$ ，N 为步进电机工作拍数。以上电机步距角为 1.8° 。

转子 S、N 极端的齿互相错半个齿，转子分为两极，S 极与有脉冲激励的绕组 N 极产生吸合力，与 S 极产生排斥力。同时，转子 N 级与定子绕组 S 极产生吸合力，与绕组 N 极产生排斥力。

每次脉冲激励，转子转过 1/4 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 $A \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{B}$ ，逆时针通电方式为 $A \rightarrow \bar{B} \rightarrow \bar{A} \rightarrow B$ 。

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 $AB \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow \bar{A}B \rightarrow AB$ 。逆时针通电顺序 $AB \rightarrow A\bar{B} \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow \bar{A}B$ 。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 $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow \bar{B} \rightarrow A\bar{B}$ ，逆时针运行的通电顺序为 $A \rightarrow A\bar{B} \rightarrow \bar{B} \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{A}B \rightarrow B \rightarrow AB$ 。

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，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。

步进电机矩频特性

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 $\theta_b = \frac{360^\circ}{K m z}$ 。

其中 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。

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达某个速度时，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。

二、 实验内容

（简述实验内容及操作过程）

步进电机位置控制

连接控制卡与直流电源，设置电源电压为 48V，给驱动器上电。电机输出端挂 3 个 200g 负载，设置速度为 180r/min，加速度 150rpm/s，脉冲数量 Rise Pos 与 Drop Pos 设置为 500000/-500000。运行程序使负载向下运动到指定位置。然后将 Switch 拨至上方使电机向上运动，并读取速度曲线。

将脉冲数量分别设置为 ± 1000000 ， ± 1500000 ， ± 2000000 ， ± 2500000 ，重复以上步骤。

步进电机矩频特性

设置细分为 40000，驱动器上电。在电机输出端挂 4 个 1kg 负载，设置 Rise Pos=20000000，Drop Pos=-1500000，ExpVel=10000，Universal Vel=180，加速度设为 100rpm/s。Switch2 拨到 Drop Pos，Switch3 拨到 Universal Vel，Switch1 拨到下方使电机运行。

到达位置时电机停止运动，将 Switch2 拨到 Rise Pos，Switch3 拨到

ExpVel, 电机停止时记录曲线最大速度。更改加速度值, 重复此步骤。

三、 实验结果及分析

(实验原始数据、实验曲线及其分析)

步进电机位置控制

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	313.2	34800
2	1000000	626.8	69640
3	1500000	940.8	104530
4	2000000	1254	139370
5	2500000	1568	174250

2. 由第一组数据得电机与输出轴传动比 $n=14.37$ 。

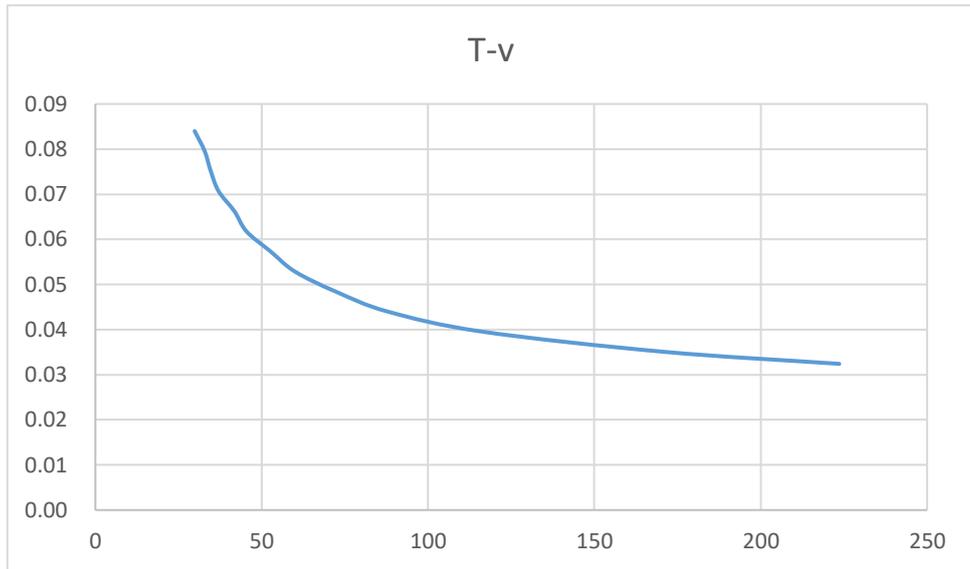
此时得到第 2~5 组理论角位移为 $626.4^\circ, 936.6^\circ, 1252.8^\circ, 1566^\circ$ 。实际角位移高于理论值, 电机出现越步现象。

步进电机矩频特性

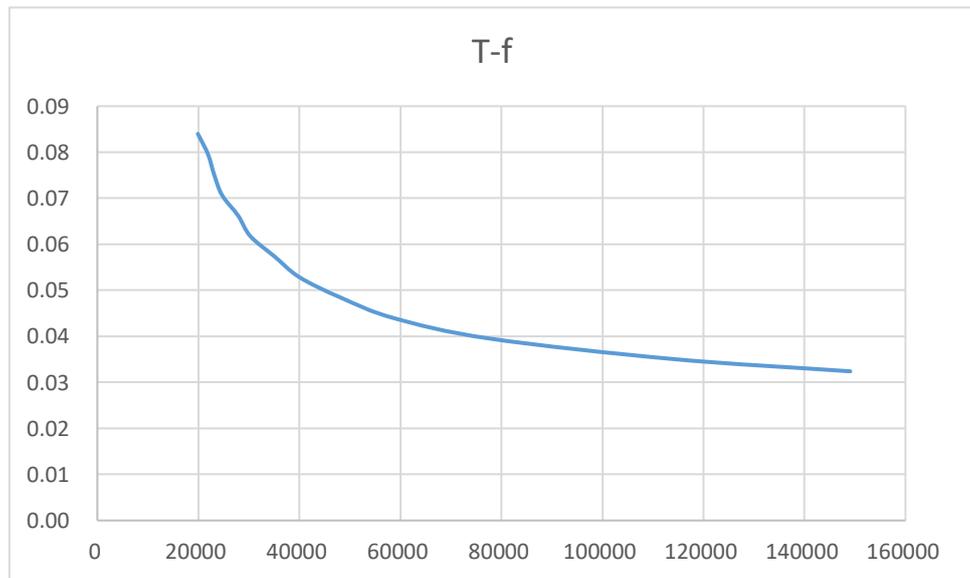
1. 计算得到 $J = 1.69846 * 10^{-4}(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$, $M_L = 0.030625(\text{N} \cdot \text{m})$

	加速度 $\alpha(\text{rpm/s})$	最大速度 v (r/min)	电机扭矩 T (N·m)	脉冲频率 f (Hz)
1	100	223.6	0.03240	149066.67
2	250	170.9	0.03507	113933.33
3	500	116.5	0.03952	77666.67
4	750	87.99	0.04396	58660.00
5	1000	72.28	0.04841	48186.67
6	1250	59.98	0.05286	39986.67
7	1500	52.68	0.05730	35120.00
8	1750	45.43	0.06175	30286.67
9	2000	41.82	0.06620	27880.00
10	2250	37.05	0.07064	24700.00
11	2500	34.7	0.07509	23133.33
12	2750	32.86	0.07954	21906.67
13	3000	29.85	0.08398	19900.00

2.



转矩速度特性曲线



矩频特性曲线

T-v 曲线表明电机所带负载增加时，最大转速降低；T-f 曲线表明脉冲频率增加，步进电机的动态转矩降低。