



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： 传感与测量反馈元件特性

实验日期： 2023 年 10 月 31 日

实验与创新实践教育中心

Education Center of Experiments and Innovations

# 一、 实验原理

## 旋转变压器

旋转变压器是自动控制装置中的一类精密控制微电机。从物理本质看，可以认为是一种可以旋转的变压器，这种变压器的原、副边绕组分别放置在定子和转子上。

当旋转变压器的原边施加交流电压励磁时，其副边输出电压将与转子的转角保持某种严格的函数关系，从而实现角度的检测、解算及传输等功能。

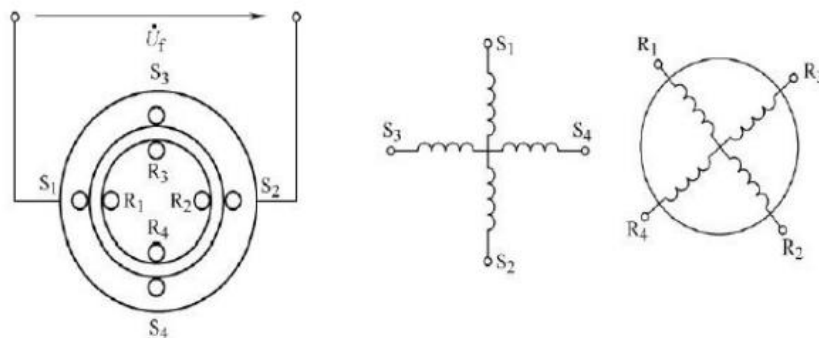


图 2-1-1 旋转变压器结构

S1-S2 定子励磁绕组，S3-S4 定子交轴绕组，

R1-R2 转子余弦输出绕组，R3-R4 转子正弦输出绕组。

本实验箱采样的是空载运行的方式，输出绕组 R1-R2 和 R3-R4 以及定子交轴绕组 S3-S4 开路，在励磁绕组 S1-S2 施加交流励磁电压此时气隙中将产生一个脉振磁场  $B_f$ ，该脉振磁场的轴线在定子励磁绕组 S1-S2 的轴线上。

设 S1-S2 轴线与 R1-R2 夹角为  $\theta$ ，励磁磁通在励磁绕组 S1-S2、正弦绕组 R3-R4 和余弦 R1-R2 中感应电势分别为：

$$E_f = 4.44fN_1k_{w1}\phi_m$$

$$E_c = 4.44fN_1k_{w1}\phi_m \cos\theta$$

$$E_s = 4.44fN_1k_{w1}\phi_m \sin\theta$$

旋转变压器变比为  $K_u$ ，忽略绕组电阻与漏抗，则  $E_s = K_u U_f \sin\theta$ ,  $E_c =$

$K_u U_f \cos\theta$ ，输出电动势与转子转角有严格正余弦关系：

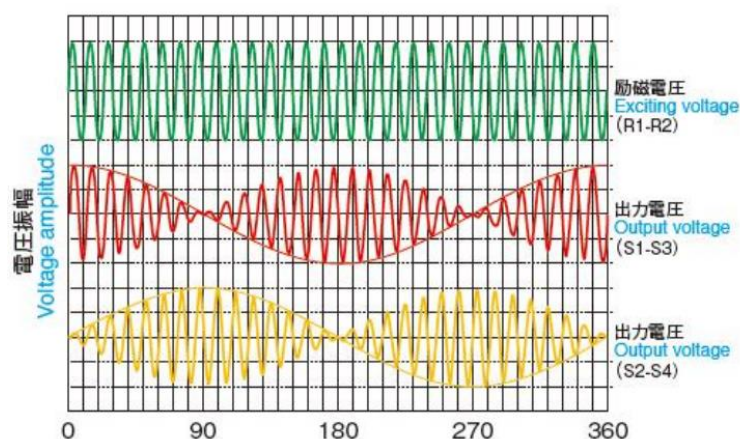


图 2-1-4 励磁侧与出力侧的波形关系图

## 增量式编码器

增量式光电编码器的特点是每产生一个输出脉冲信号就对应于一个增量位移，但是不能通过输出脉冲区别出在哪个位置上的增量。它能够产生与位移增量等值的脉冲信号，其作用是提供一种对连续位移量离散化或增量化以及位移变化（速度）的传感方法，它是相对于某个基准点的相对位置增量，不能够直接检测出轴的绝对位置信息。一般来说，增量式光电编码器输出 A、B 两相互差  $90^\circ$  电度角的脉冲信号（即所谓的两组正交输出信号），从而可方便地判断出旋转方向。同时还有用作参考零位的 Z 相标志（指示）脉冲信号，码盘每旋转一周，只发出一个标志信号。标志脉冲通常用来指示机械位置或对积累量清零。增量式光电编码器主要由光源、码盘、检测光栅、光电检测器件和转换电路组成。

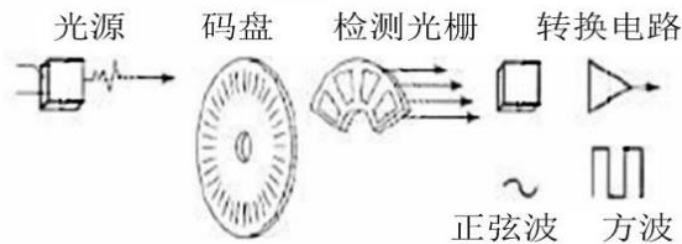


图 2-2-1 增量式光电编码器结构分解图

码盘上刻有节距相等的辐射状透光缝隙，相邻两个透光缝隙之间代表一个增量周期；检测光栅上刻有 A、B 两组与码盘相对应的透光缝隙，用以通过或阻挡光源和光电检测器件之间的光线。它们的节距和码盘上的节距相等，并且两组透光缝隙错开  $1/4$  节距，使得光电检测器件输出的信号在相位上相差  $90^\circ$  电度角。当码盘随着被测转轴转动时，检测光栅不动，光线透过码盘和检测光栅上的透过缝隙照射到光电检测器件上，光电检测器件就输出两组相位相差  $90^\circ$  电度角的近似于正弦波的电信号，电信号经过转换电路的信号处理，可以得到被测轴的转角或速度信息。

当编码器在正转时，A 相信号的上升沿对应 B 相信号的高电平，A 相信号的下降沿对应 B 相信号的低电平。此时 A 相信号无论是上升沿还是下降沿都产生了一个脉冲，在进行脉冲计数时必须计算进去。在记录时需要考虑编码器是在正转还是反转，若正转，则加上脉冲；若反转，则减去脉冲。

在进行程序设计时，首先需要判断编码器是在正转还是在反转，接着需要找出 A、B 相的上升沿和下降沿，最后处理数据。编码器正转，A、B 相在处于上升沿或下降沿时都应加上脉冲；编码器反转，A、B 相在处于上升沿或下降沿时都应减去脉冲；A、B 相重合时，同时加上脉冲或减去脉冲。

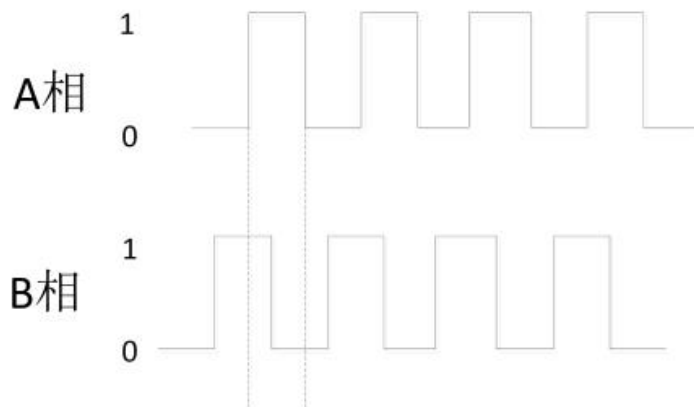


图 2-2-2 增量式光电编码器正转波形

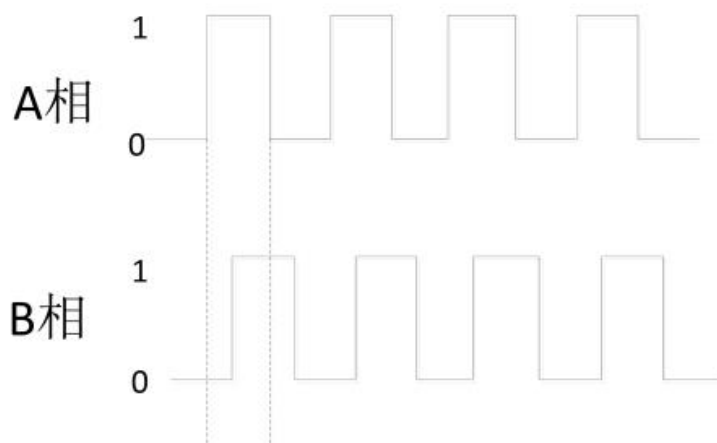


图 2-2-3 增量式光电编码器反转波形

## 增量式光栅尺

光栅尺是利用光栅的光学原理工作的测量反馈装置，常应用于数控机床的闭环伺服系统中，可用作直线位移或者角位移的检测。其测量输出的信号为数字脉冲，具有检测范围大，检测精度高，响应速度快的特点。

光栅位移传感器的工作原理，是由一对光栅副中的主光栅（即标尺光栅）和副光栅（即指示光栅）进行相对位移时，在光的干涉与衍射共同作用下产生黑白相间（或明暗相间）的规则条纹图形，称之为莫尔条纹。经过光电器件转换使黑白（或明暗）相同的条纹转换成正弦波变化的电信号，再经过放大器放大，整形电路整形后，得到两路相差为  $90^\circ$  的正弦波或方波，送入光栅数显表计数显示。

常见光栅的工作原理都是根据物理上莫尔条纹的形成原理进行工作的，当使指示光栅上的线纹与标尺光栅上的线纹成一角度来放置两光栅尺时，必然会造成两光栅尺上的线纹互相交叉。在光源的照射下，交叉点近旁的小区域内由于黑色线纹重叠，因而遮光面积最小，挡光效应最弱，光的累积作用使得这个区域出现亮带。相反，距交叉点较远的区域，因两光栅尺不透明的黑色线纹的重叠部分变得越来越少，不透明区域面积逐渐变大，即遮光面积逐渐变大，使得挡光效应变强，只有较少的光线能通过这个区域透过光栅，使这个区域出现暗带。这些与光栅线纹几乎垂直，相间出现的亮、暗带就是莫尔条纹。

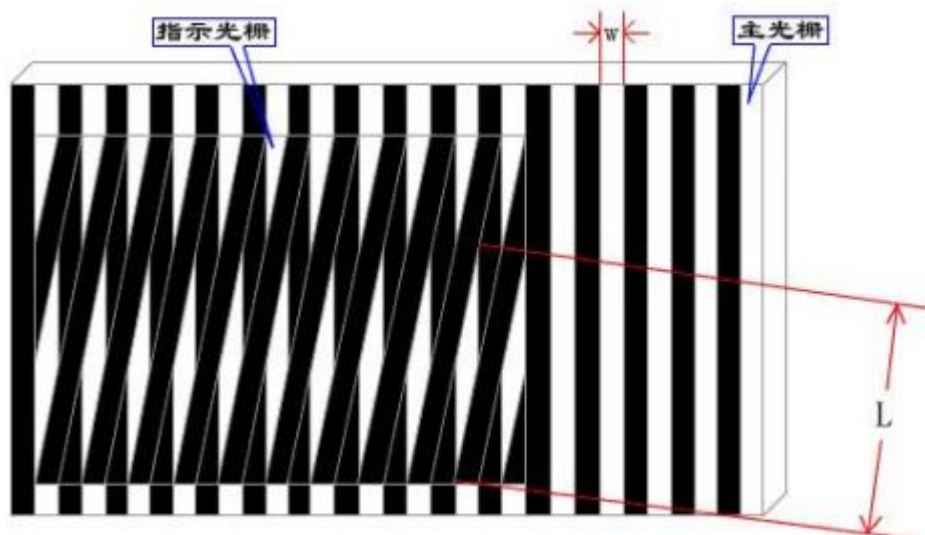


图 2-3-1 直线光栅莫尔条纹

1. 当用平行光束照射光栅时，透过莫尔条纹的光强度分布近似于余弦函数；
2. 用  $W$  表示莫尔条纹的宽度， $d$  表示光栅的栅距， $\theta$  表示两光栅尺线纹的夹角，则几何关系为  $W = \frac{d}{\sin\theta}$ ，当角度很小时，上式可近似为  $W = \frac{d}{\theta}$ 。若  $d = 0.01\text{mm}$ ， $\theta = 0.01\text{rad}$ ，则由上式可得  $W = 1\text{mm}$ 。这说明，无需复杂的光学系统和电子系统，利用光的干涉现象，就能把光栅的栅距转换成放大 100 倍的莫尔条纹的宽度。这种放大作用是光栅的一个重要特点；
3. 由于莫尔条纹是由若干条光栅线纹共同干涉形成的，所以莫尔条纹对光栅个别线纹之间的栅距误差具有平均效应，能消除光栅栅距不均匀所造成的影响；
4. 莫尔条纹的移动与两光栅尺之间的相对移动相对应。两光栅尺相对移动一个栅距  $d$ ，莫尔条纹便相应移动一个莫尔条纹宽度  $W$ ，其方向与两光栅尺相对移动的方向垂直，且当两光栅尺相对移动的方向改变时，莫尔条纹移动的方向也随之改变。

根据上述莫尔条纹的特性，假如我们在莫尔条纹移动的方向上开 4 个观察窗口 A, B, C, D 且使这 4 个窗口两两相距  $\frac{1}{4}$  莫尔条纹宽度，即  $\frac{W}{4}$ ，当两光栅尺相对移动时，莫尔条纹随之移动，从 4 个观察窗口 A、B、C、D 可以得到 4 个在相位上依次超前或滞后（取决于两光栅尺相对移动的方向） $\frac{1}{4}$  周期（即  $90^\circ$ ）的近似于余弦函数的光强度变化过程。

若采用光敏元件来检测，光敏元件把透过观察窗口的光强度变化转换成相应的电压信号。由 4 个光敏器件获得的 4 路光电信号分别送到 2 只差分放大器输入端，从差分放大器输出的两路信号其相位差为  $90^\circ$ ，为得到判向和计数脉冲，需对这两路信号进行整形，首先把它们整形为占空比为 1:1 的方波。然后，通过对方波的相位进行判别比较，就可以得到光栅尺的移动方向。通过对方波脉冲进行计数，可以得到光栅尺的位移和速度。

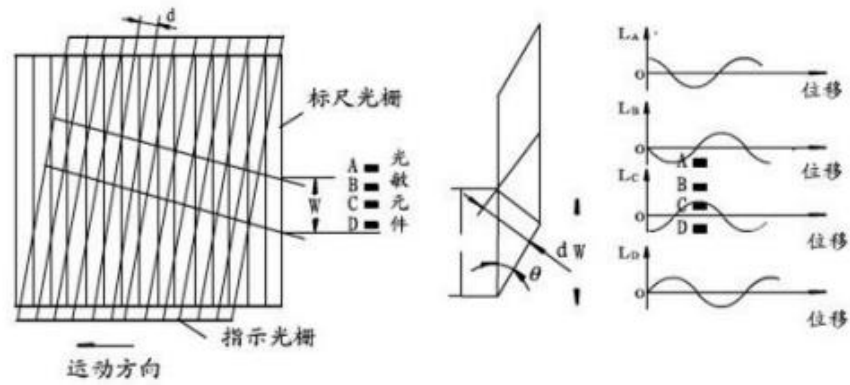


图 2-3-2 直线光栅莫尔条纹工作特性

## 二、 实验内容

### 旋转变压器

CN1 连接 CN2，USB 与上位机连接，连接电源并上电。编译程序后，手动旋转电箱上旋转变压器圆盘（匀速/变速），记录波形与包络线波形。

### 增量式编码器

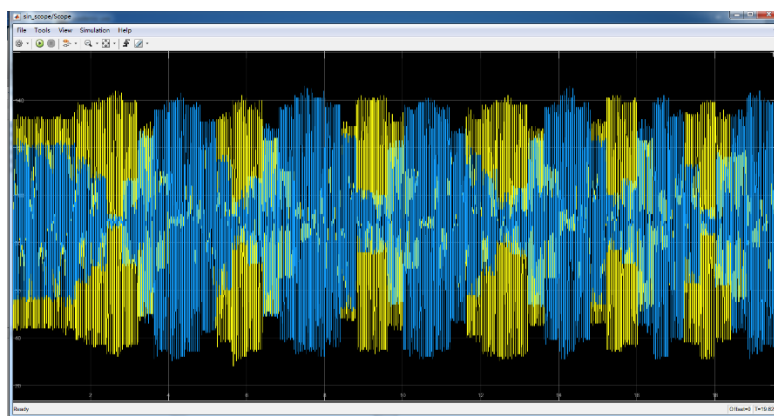
CN1 连接 CN3，编译程序。转动增量式编码器，读取脉冲计数器数值，并观察两相波形。

### 增量式光栅尺

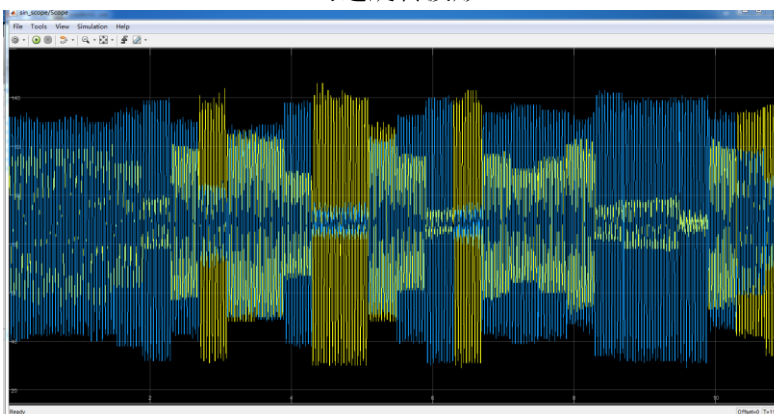
CN1 连接 CN4，编译程序。滑动光栅尺对应滑块，观察输出波形，以及 A、B 相上升沿对应波形（filter）。

### 三、 实验结果及分析

#### 旋转变压器



匀速旋转波形



变速旋转波形

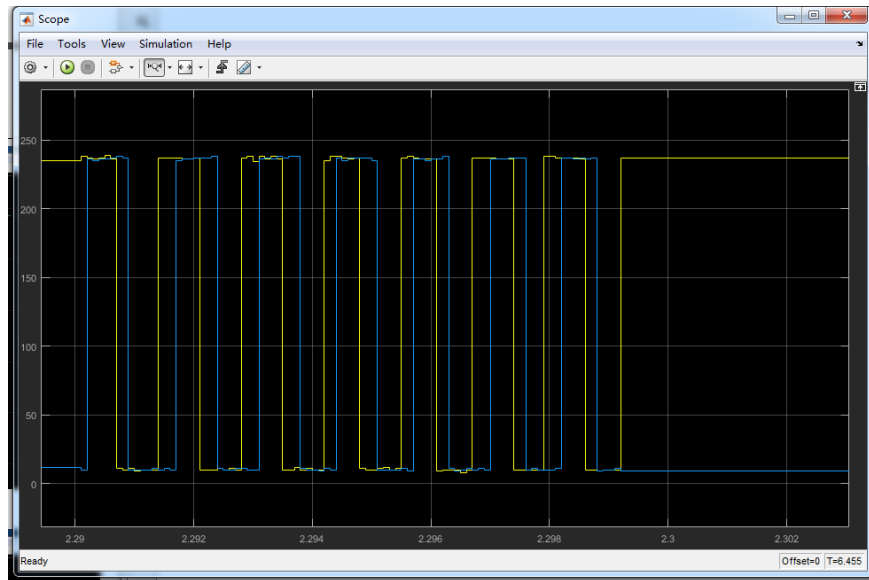
设输入端电压为 $u = U_m \sin \omega t$ ，则 sin 相输出电压为 $u_s = KU_m \sin \omega t \sin \theta$ ，  
cos 相输出为 $u_c = KU_m \sin \omega t \cos \theta$ ，其中 $\theta$ 为旋转角度。此时可通过

$$u = u_s + u_c = KU_m \sin \omega t \sin(\theta + \varphi)$$

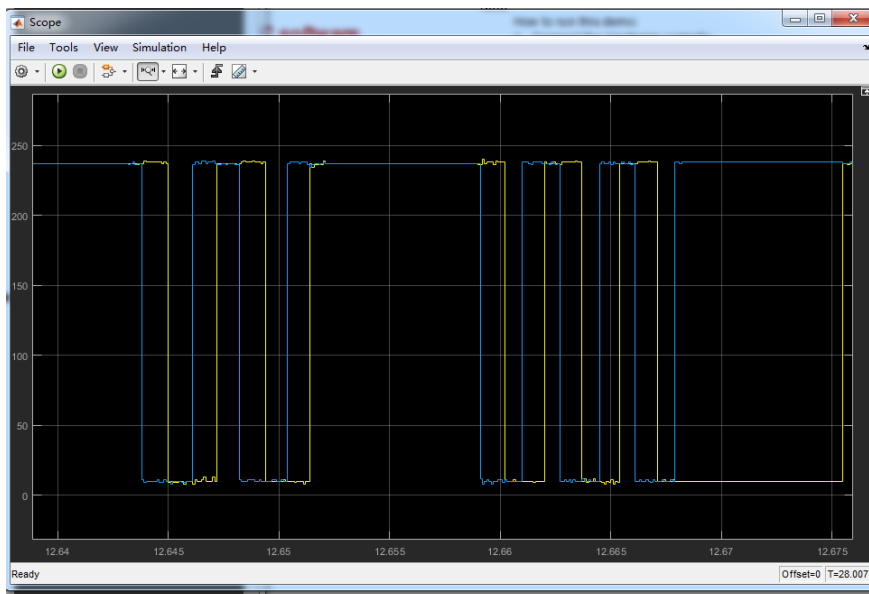
得到合成电压幅值，从而得出旋转角度。

#### 增量式编码器

编码器旋转一圈数值为 2340，理论值为 2400。采用四倍频电路对信号进行处理时，编码器旋转一圈计数脉冲为  $600 \times 4 = 2400$  个。



编码器正转

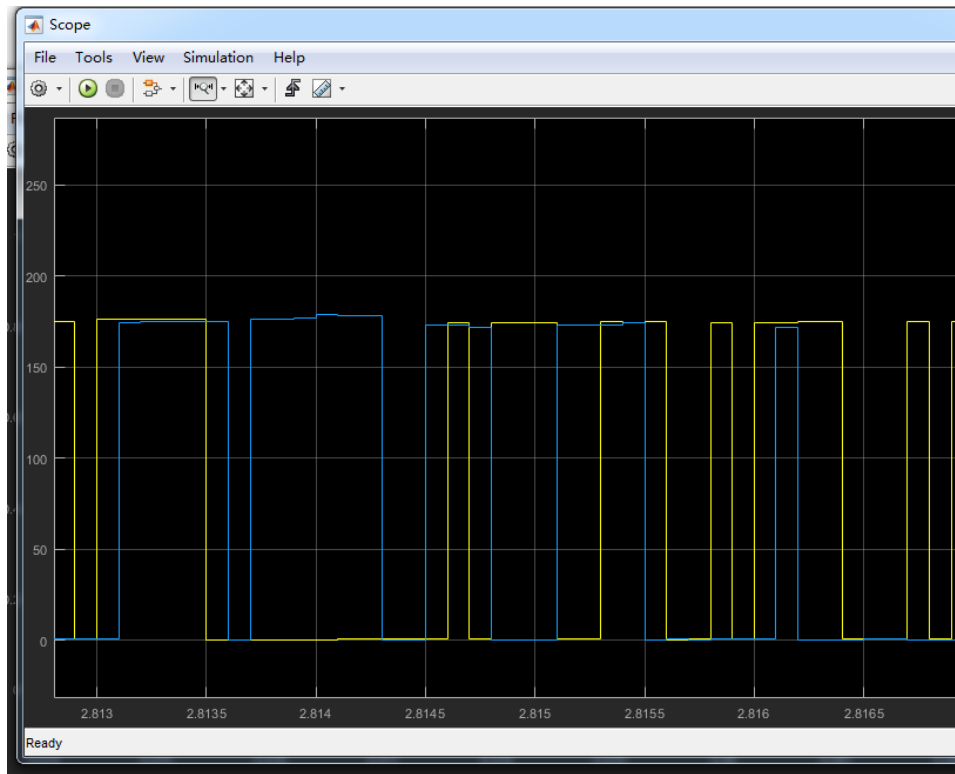


编码器反转

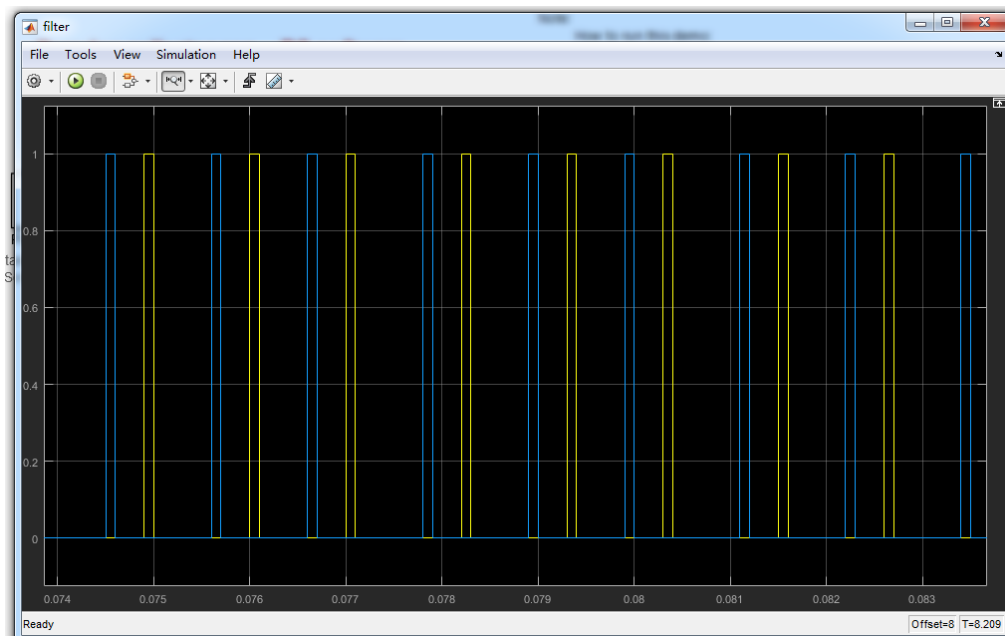
## 增量式光栅尺

光栅尺与增量式编码器脉冲波形较为相似，均出现 A、B 相电平变化，且相位差为  $90^\circ$ 。

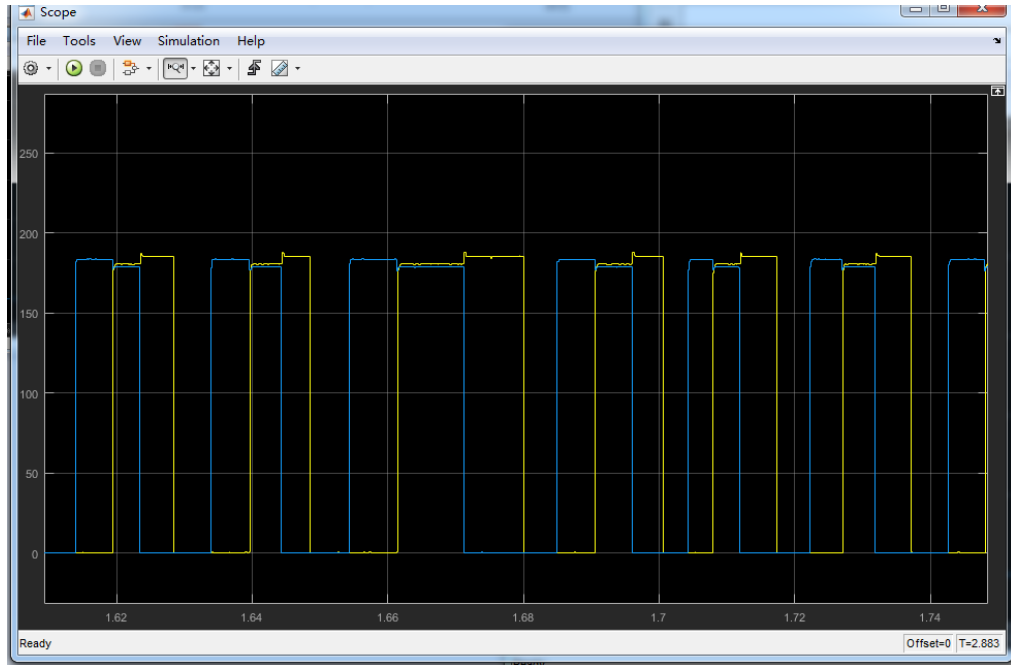




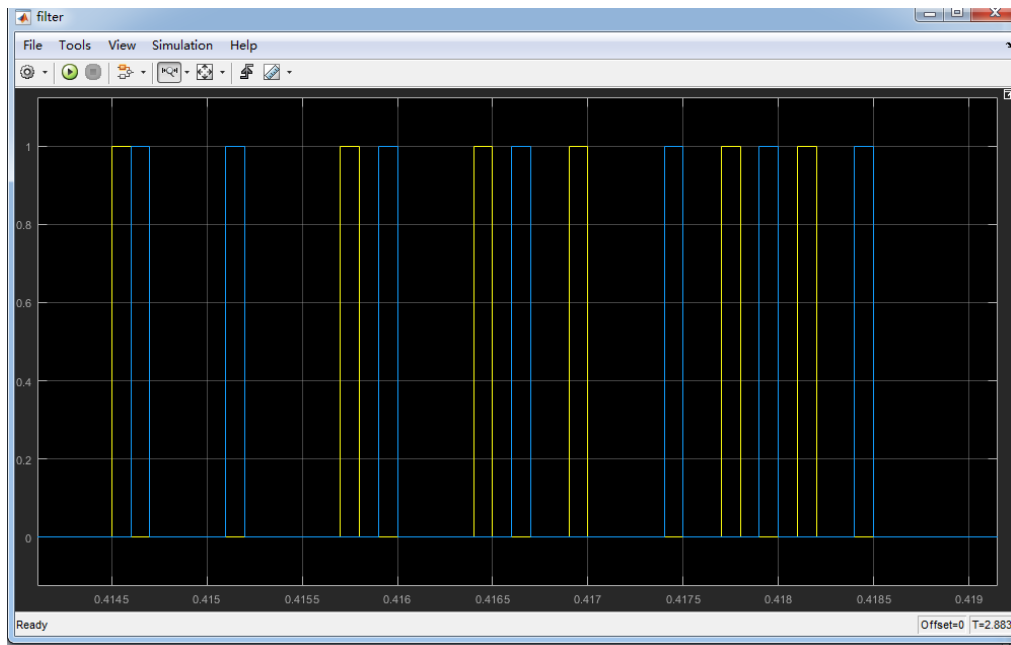
光栅尺正向



光栅尺正向 filter



光栅尺反向



光栅尺反向 filter