

## 作业七 时域方法校正

电 02 肖锦松 2020010563

### 实验任务

1. 根据作业二的线性模型，列出含 AVR 闭环系统的状态方程，以机端电压  $V_t$  为输出。基于该模型，分析系统的能控性与能观性。

作业二的线性模型

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}_q' \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_q' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta V_f \\ \Delta V_t &= \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_q' \end{bmatrix} \end{aligned}$$

写作：

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned}$$

A =

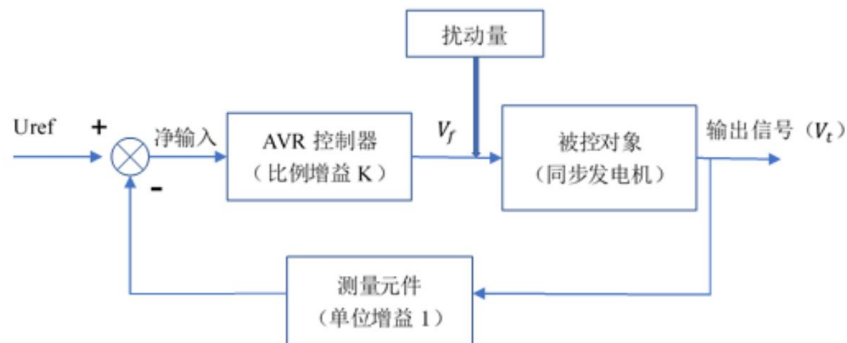
$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -0.176857273016802 & -0.02 & -0.188714959768008 \\ -0.260525480465327 & 0 & -0.551999097649515 \end{bmatrix}$$

B =

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.16366612111293 \end{bmatrix}$$

C =

$$\begin{bmatrix} 0.112802835334856 \\ 0 \\ 0.461422960654596 \end{bmatrix}$$



含 AVR 闭环系统

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + BK(u(t) - y(t)) = (A - KBC)x(t) + KBu(t)$$

状态方程为：

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A - KBC)x(t) + KBu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned}$$

系统能控性和能观性可以利用秩判据来判断：

最终分析的结果是，系统能控能观！

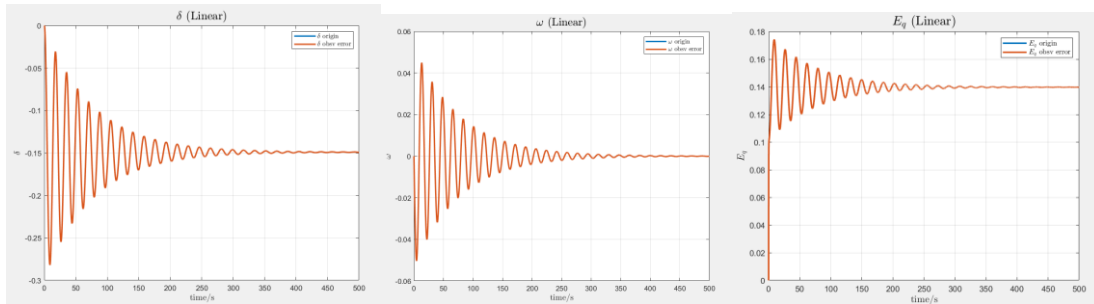
```
S =  
  
          0          0      -0.308862454612125  
          0      -0.308862454612125      0.409919828056362  
1.6366612111293      -2.13943070258156      2.7966470397318  
  
rank_S =  
  
      3  
  
~~~~~> rank(S)=3, 系统能控 <~~~~~  
  
V =  
  
      0.112802835334856          0      0.461422960654596  
-0.205400357099101      0.112802835334856      -0.60316847627822  
0.248547734466822      -0.207656413805798      0.767169520382209  
  
rank_V =  
  
      3  
  
~~~~~> rank(V)=3, 系统能观 <~~~~~
```

2. 设计一个状态观测器，通过作业二中非线性和线性模型进行仿真，对比观测器的输出结果和实际系统结果的区别。分析在系统模型参数改变与考虑观测误差的条件下，观测器的输出结果和实际系统结果的区别。

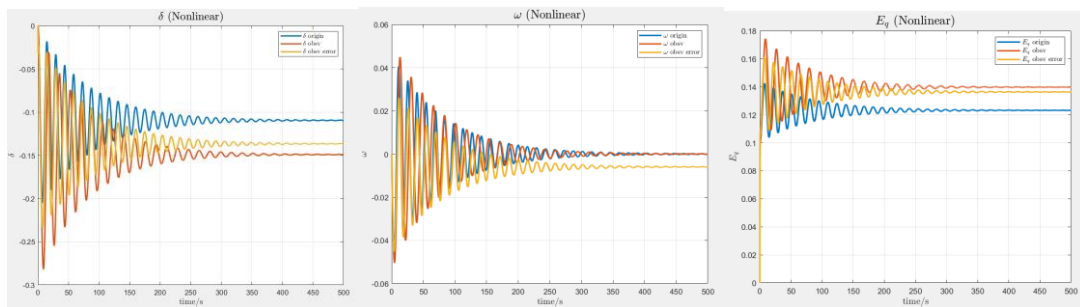
系统能观，状态观测器极点位置可任意配置。

设置状态观测器极点为 $[-5, -2 + j, -2 - j]$ ，选取 AVR 增益为 $K_{AVR} = 100$ ，阶跃为 0.05。

线性模型下，原系统和状态观测器（考虑观测误差）的状态量输出如下：



非线性模型下，原系统和状态观测器（不考虑观测误差以及考虑观测误差）的状态量输出如下：



对比观测器的输出结果和实际系统结果的区别：

线性模型下，观测器的输出结果和实际系统结果几乎重合。这是因为设计状态观测器是就是基于状态函数，也就是线性模型的，因此二者的状态量输出是相同的，最终的误差 $\tilde{x}$ 趋近于零。

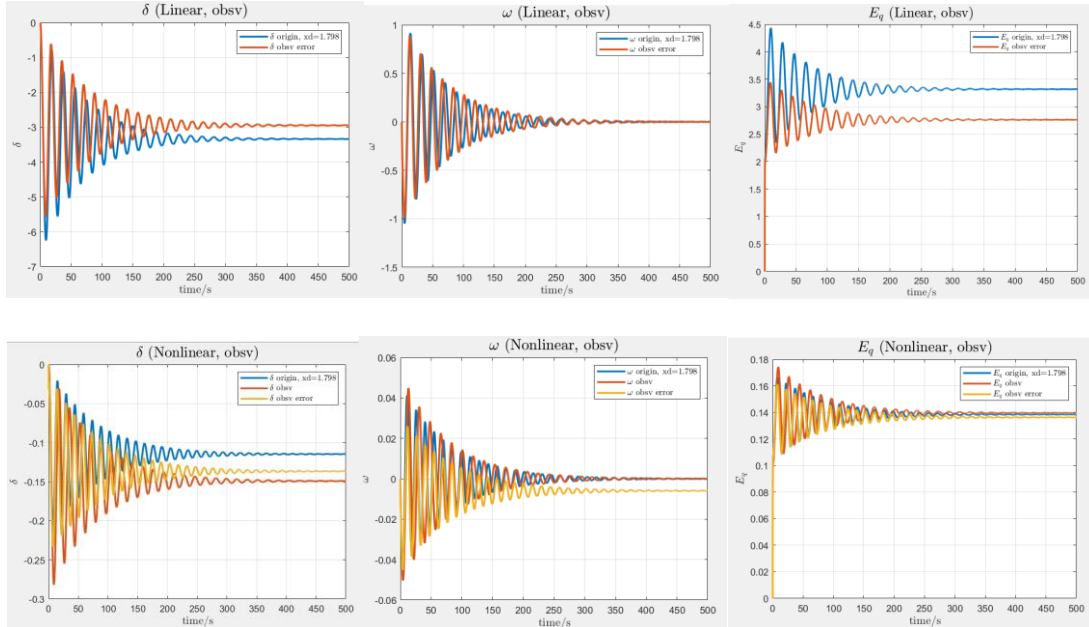
非线性模型下，观测器的输出和实际系统存在误差。由于状态观测器是基于状态函数设计的，而原系统采用非线性模型仿真，因此二者必然存在一定的误差。

可以从稳态阶段看出，相对于不考虑观测误差，考虑了观测误差之后（yellow），观测器状态量输出与原系统的误差 $\tilde{x}$ 更小，但也有例外，比如 $\omega$ 。也就是说一般考虑观测误差后观测器得到的状态量更加准确了。

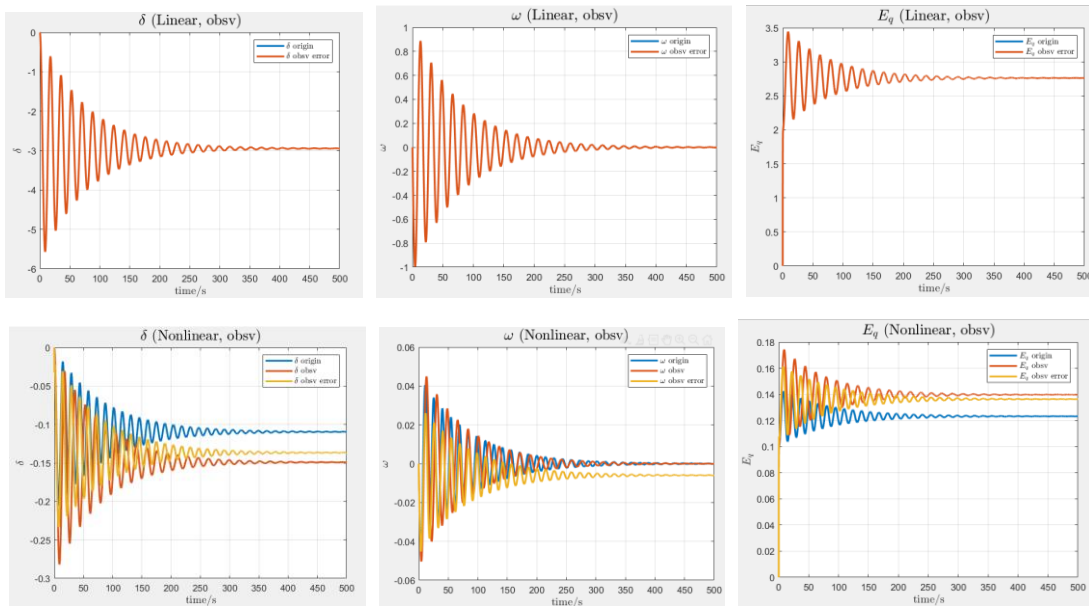
系统模型参数改变，可以考虑改变  $d$  轴电抗  $x_d$ 、AVR 增益  $K_{AVR}$ 。

改变  $d$  轴电抗  $x_d$ ，线性模型+非线性模型

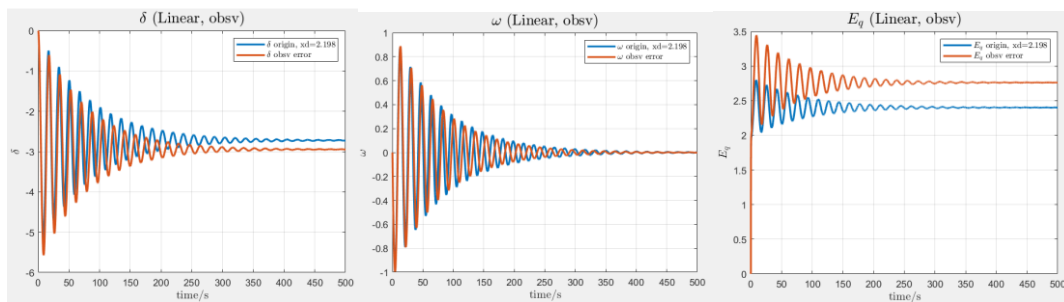
$x_d = 1.798$

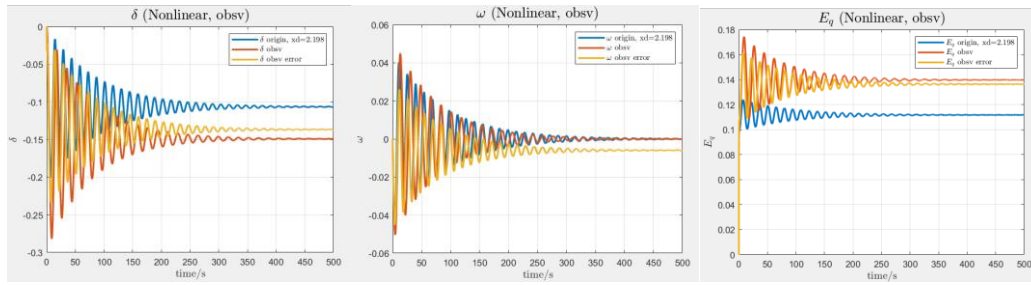


$x_d = 1.998$



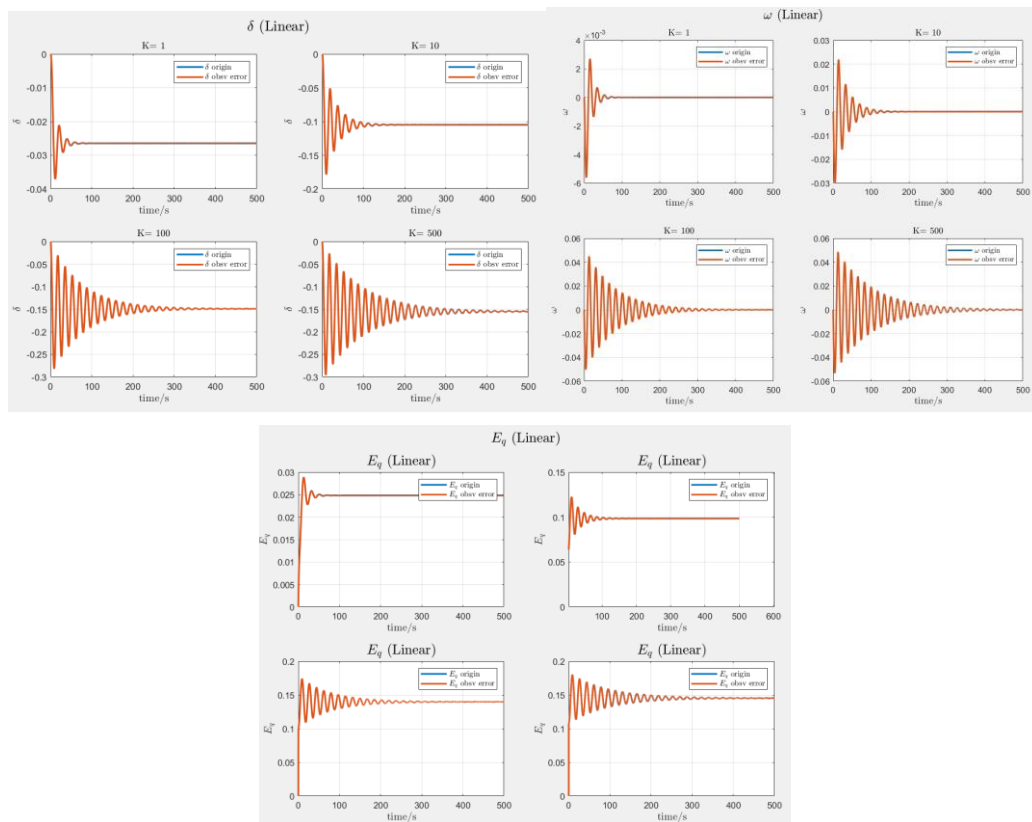
$x_d = 2.198$



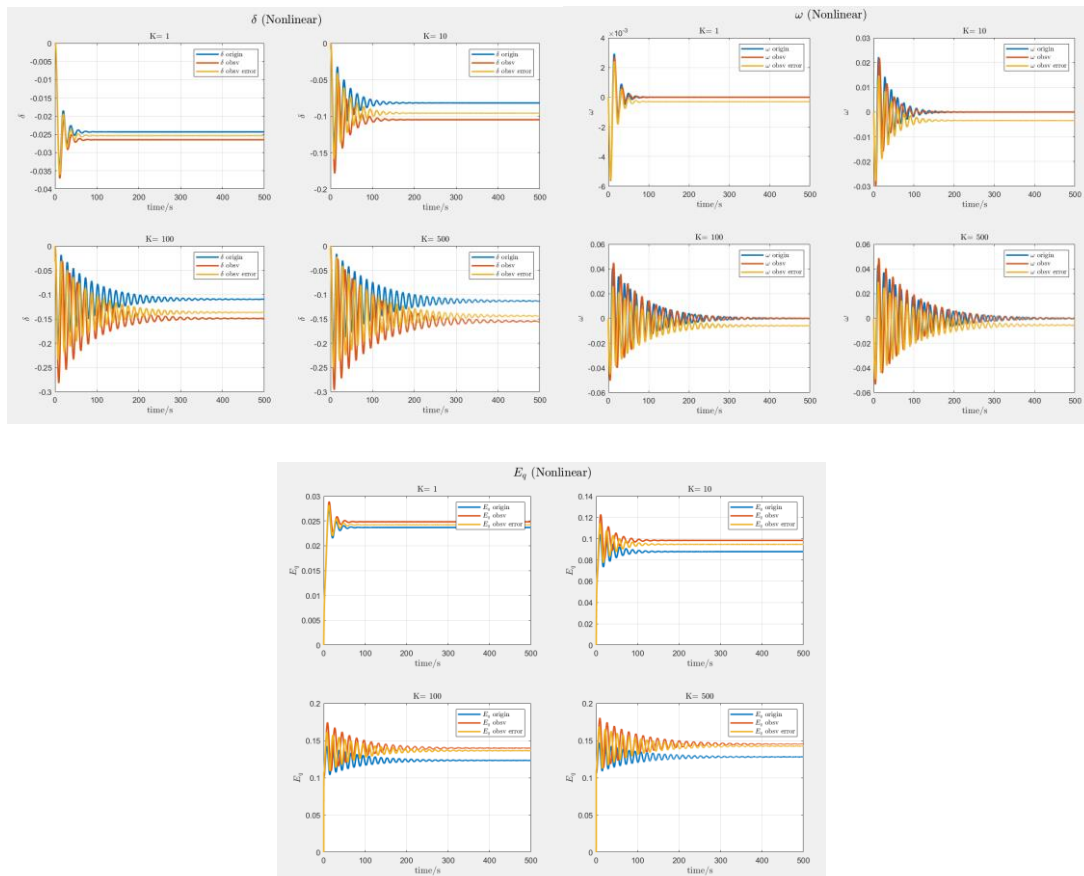


从上图可以看出。 $d$  轴电抗  $x_d$  变化，线性模型观测器的输出结果和实际系统结果出现误差，随着  $x_d$  增大， $\delta$  稳态值逐渐增大， $\omega$  稳态值几乎不变， $E'_q$  稳态值逐渐减小。线性模型观测器与实际系统输出的误差发生变化，随着  $x_d$  增大似乎  $E'_q$  的误差减小， $\delta$  的误差增大，但其实本质上都是原系统和观测器检测的状态量发生了偏差，只是偏差方向恰好让原本就存在的观测误差放大或缩小了。

线性模型，改变 AVR 增益  $K_{AVR}$



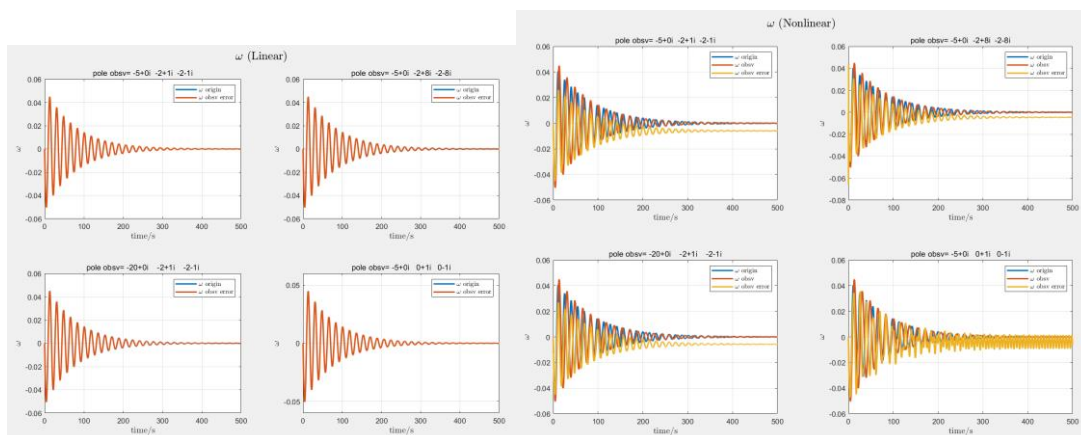
非线性模型，改变 AVR 增益  $K_{AVR}$



对于线性模型,增大 AVR 增益带来的结果是使得状态量输出的超调量更大,调整时间更长,而系统相应的时间似乎缩短,观测器与实际系统仍几乎没有误差。

对于非线性模型,增大 AVR 增益带来的结果是使得状态量输出的超调量更大,调整时间更长,而系统相应的时间似乎缩短。增益  $K$  越大,误差的绝对值越大。

改变观测器配置的极点,观测器状态量的输出几乎没变化,仍然保持和实际系统高度重合。鉴于此,这里仅以  $\omega$  为例。



可以发现,观测器极点配置的不同对观测器状态量输出的静态和动态性能其实影响并不算很大;而当配置的极点在虚轴上是,观测器无法到达稳态。从

图中可以看出，只需要避免配置的极点虚部绝对值过大以及保证极点实部在左半平面即可。

最终仍然选用状态观测器极点为 $[-5, -2 + j, -2 - j]$

3. 根据作业四获得的较好零极点，设计含状态观测器的状态反馈控制器。从“稳、准、快”角度优化状态反馈控制器，思考是否存在最优的状态反馈控制器？

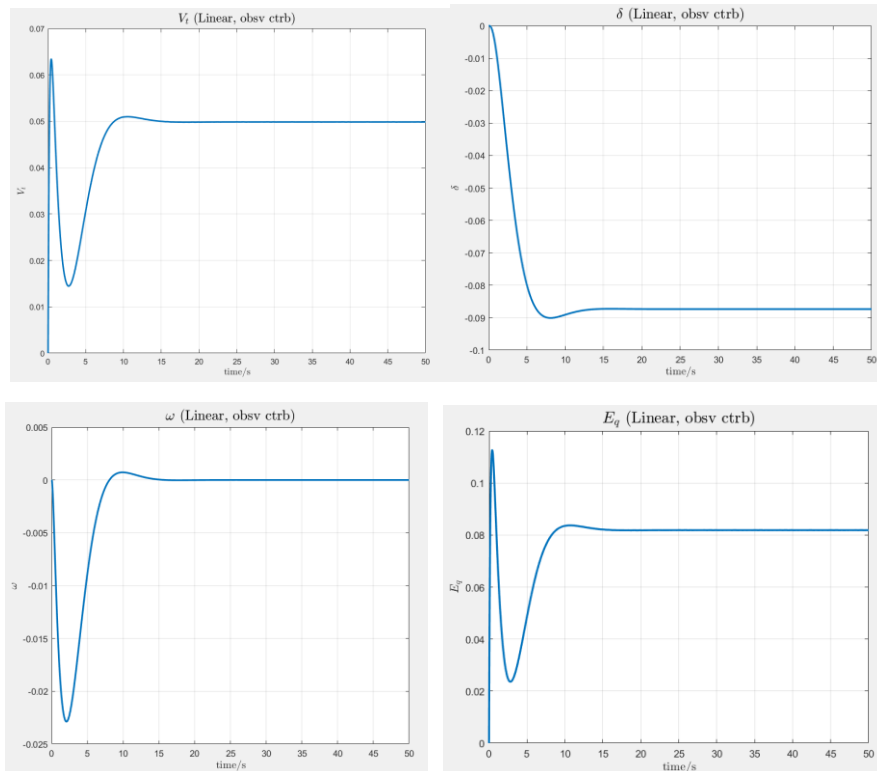
配置极点的时候，极点配置在左半平面，保证闭环系统的稳定性。配置极点远离虚轴，则 $\omega$ 等状态量的超调量更小、调整时间更短，动态性能更好；但这也会带来 $V_t$ 的稳态误差变大，对 $U_{ref}$ 的跟随效果变差。因此从“稳、准、

快”的角度分析系统，我们应该首先保证系统的稳定性，留有一定的稳定裕度，然后在输出量的“准”和状态量的“快”上做出一定的 tradeoff。因此并不存在最优的状态反馈控制器，但可以根据实际情况调节出最适合该场景的状态反馈控制器。

最终，优先保证线性模型的性能。

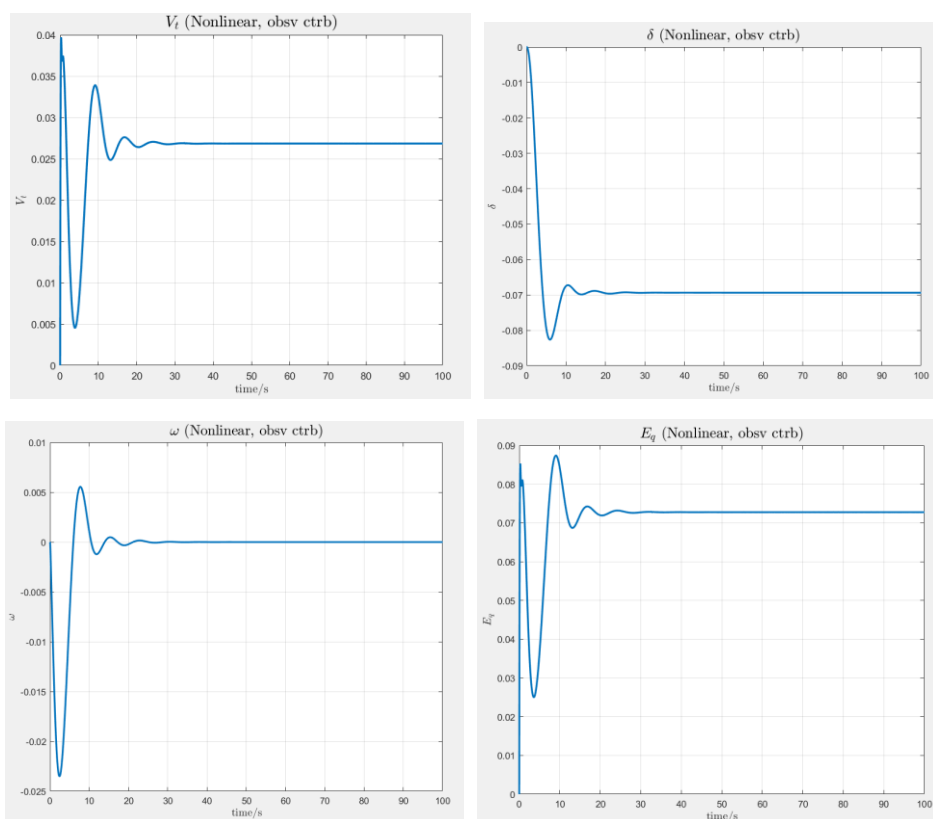
选择观测器极点为 $[-5, -2 + j, -2 - j]$ ，控制器极点为 $[-5, -0.44 + 0.4j, -0.44 - 0.4j]$

线性模型，加入状态反馈 $K_{ctrl}$ 。



非线性模型，加入状态反馈 $K_{ctrl}$ 。





可以发现，线性系统的各状态量和输出量基本控制在 15 个单位时间内，非线性系统则控制在 20 个单位时间内，两个系统的超调量等动态性能均较为可观。线性系统输出 $V_t$ 跟随 $U_{ref}$ 的效果很好，而非线性系统的跟随能力则略显不足。因为对状态量直接进行比例反馈，相当于将三个状态量以不同的比例返回到输入了，而这里的比例反馈是根据线性系统调节的，如果此时的工作点与线性化时存在偏差，则最终非线性系统也是必然存在偏差的。

若要进一步优化非线性系统输出量 $V_t$ 的跟随能力，可以加入积分环节，构造带积分控制的状态反馈系统。

#### 4. 基于上述时域校正过程，分析讨论时域校正方法与频域校正方法的优劣。

时域校正方法，即状态变量反馈控制系统，它是建立在系统的能控能观性上的。这就说明相对于频域校正，它多了一些要求，不完全能观系统不能建立全维观测器，不完全能控系统不能实现对所有状态的反馈控制。方便之处在于，全维状态反馈使闭环极点可任意配置，而极点对系统的影响是比较简单的，如极点的实部影响分量的衰减速度，虚部影响分量的振荡频率等等。但经过实践发现，由于观测器等是从线性模型出发，因此最终的校正效果对线性系统较好，而对非线性系统则仍存在误差。

频域校正一般的方法是通过串联超前、滞后等环节来改变系统的幅频特性和相频特性。主要的优点是频域校正比较有章可循，主要是通过看系统的 bode 图来判断其对频域特性的影响，可以调节稳定裕度和穿越频率，最后其实频域校正也是对线性系统较好。

#### d. 总结

对比线性模型与其线性观测器的异同，非线性模型与其线性观测器的异同，思考此种异同出现的原因，是否有改进的措施；

线性模型与其线性观测器几乎在任何情况下都没有误差，这是因为设计观测器本身就是基于状态函数，等价于线性模型，因此二者的状态量输出理应是相同的。

非线性模型与其线性观测器的输出存在误差。这是因为状态观测器是基于状态函数设计的，而原系统采用非线性模型仿真，因此二者必然存在一定的误差。但是增大  $d$  轴电抗或减小 AVR 增益可以减小二者误差。

#### 总结状态观测器和状态反馈控制器的一般设计方法；

设计状态观测器，首先要判断其能观性，系统能观，则观测器极点位置可任意配置。随后设置观测器的极点，调整其估计速度；选取一个增益矩阵  $G$ ，利用  $G$  下的观测器特征多项式与期望的观测器特征多项式进行对比，推出观测器增益  $G$ ，从而推出观测器方程。

设计带观测器的状态反馈控制器，首先同上设计状态观测器，然后选取闭环系统的配置极点，随后求出状态反馈矩阵  $K$ ，即从状态观测器输出  $\hat{x}$  到被控系统输入  $u$ ，引入状态反馈  $K$ 。

编程时间：约 7 小时。

撰写报告时间：5 小时。

总结与反馈：😊